

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
Katedra elektroenergetiky

**Optimalizace provozu malé vodní  
elektrárny**

Optimizing the Operation of Small  
Hydropower Plants

2016

Bc. Josef Dolinský

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Josef Dolinský**  
Studijní program: N2649 Elektrotechnika  
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika  
Téma: **Optimalizace provozu malé vodní elektrárny.  
Optimizing the Operation of Small Hydropower Plants.**  
Jazyk vypracování: čeština

### Zásady pro vypracování:

Malé vodní elektrárny, základní principy a typy.  
Popis konkrétní MVE.  
Rozbor provozních vlastností a návrh optimalizace.  
Vícekritériální vyhodnocení.


### Seznam doporučené odborné literatury:

Thustý, J. a kol.: Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí, ČVUT Praha, 2011  
Thustý, J. a kol.: Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, ČVUT Praha, 2011  
Mastný, P. a kol.: Obnovitelné zdroje elektrické energie, ČVUT Praha, 2011  
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2015  
Datum odevzdání: 29.04.2016

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 28.4.2016

Podpis:



Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Petru Bernatovi, Ph.D., za ochotnou spolupráci a za cenné podněty a rady při vedení mé diplomové práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací provozu malé vodní elektrárny umístěné na řece Bělá v okrese Jeseník. Vodní elektrárna prošla před dvěma lety celkovou rekonstrukcí a cílem práce je najít možnosti navýšení výkonu, které budou mít zároveň pozitivní vliv na ekonomiku provozu. V úvodu práce je vysvětleno, co je to vodní energie a jakým způsobem vodní elektrárna pracuje. Ve druhé části práce jsou popsány části vodní elektrárny. Hlavní část je zaměřena na zkoumání místních podmínek, přičemž jsou zhodnocením současného stavu MVE Domašov nalezeny varianty optimalizace provozu. V poslední části práce jsou jednotlivé varianty posouzeny pomocí multikriteriální analýzy a v závěru je doporučena nejlepší varianta.

## **Klíčová slova**

Vodní energie, malá vodní elektrárna, vodní turbína, asynchronní generátor, rekonstrukce, současný stav, vícekritériální analýza, investiční náklady, čistá současná hodnota, doba návratnosti, Fullerův trojúhelník, Saatyho metoda, metoda váženého součtu.

## **Abstract**

This master thesis deals with optimizing the operation of small hydropower plant located on the river Bela in Jeseník district. Hydroelectric plant has been renovated in 2014 and the main target of this thesis is to find possibilities, how to increase amount of produced energy. In the first part is explained what the water energy is and how hydroelectric plant works. In the next part we find detailed information about each part of hydroelectric plant. Main part of this Master thesis is focused on research of current conditions. On the basis of this research have been chosen four variants of optimizing. The last section is devoted to multi-criteria analysis, by which is selected the best variant of optimization.

## **Key Words**

Hydroelectric power, small hydro power plant, water turbine, asynchronous generator, reconstruction, current conditions, multi-criteria analysis, investment costs, net present value, payback period, Fuller's triangle, Saaty's method, weighted sum approach.

## Obsah

<b>1. ÚVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. ZDROJE VODNÍ ENERGIE .....</b>	<b>2</b>
2.1. Vodní elektrárna a její princip.....	3
2.2. Rozdělení vodních elektráren.....	4
2.3. Význam vodních elektráren pro energetiku v ČR .....	6
2.4. Výhody a nevýhody vodních elektráren.....	6
2.5. Podíl MVE na energetické bilanci ČR .....	7
2.6. Základní části vodního díla .....	7
2.6.1. Jezy .....	8
2.6.2. Vtokové objekty .....	8
2.6.3. Česle .....	9
2.6.4. Stavidlo.....	9
2.6.5. Přivaděče a odpady.....	10
2.6.6. Vodní motory a jejich dělení .....	10
2.6.7. Převody.....	18
2.6.8. Elektrotechnické zařízení MVE .....	20
2.6.9. Generátory .....	20
<b>3. NÁVRH OPTIMALIZACE VÝKONU .....</b>	<b>22</b>
3.1. Popis současného stavu .....	22
3.1.1. Jez a vtokový objekt.....	22
3.1.2. Vtokový objekt.....	22
3.1.3. Přívodní náhon .....	23
3.1.4. Strojovna .....	24
3.1.5. Technologické vybavení strojovny.....	24
3.1.6. Odpadní kanál.....	25
3.1.7. Vodohospodářské údaje: .....	25
3.2. Zhodnocení současného stavu .....	26
3.2.1. Vtokový objekt a náhon.....	26
3.2.2. Soustrojí turbína-generátor.....	27
3.2.3. Odpadní kanál.....	28
3.3. Možnosti optimalizace výkonu .....	28
3.3.1. Ověření přívodního náhonu.....	28

3.3.2. Ověření účinnosti turbíny .....	30
<b>4. MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA .....</b>	<b>31</b>
4.1. Kritéria rozhodování .....	32
4.1.1. $K_1$ – délka odstávky .....	32
4.1.2. $K_2$ – investiční náklady .....	33
4.1.3. $K_3$ – čistá současná hodnota – NPV .....	33
4.1.4. $K_4$ – doba návratnosti .....	34
4.2. Fullerova metoda .....	34
4.3. Saatyho metoda .....	36
4.4. Metoda váženého součtu – WSA .....	39
4.4.1. Výpočet pomocí WSA metody .....	40
<b>5. ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>

## **LITERATURA**

## **PŘÍLOHY**

## Seznam použitých zkratk a symbolů

ČR	Česká republika
ČSN	Česko Slovenská norma
DN	Vnitřní průměr potrubí
GWh	Giga Watt hodina
MVE	Malá vodní elektrárna
MW	Mega Watt
MWh	Mega Watt hodina
NN	Nízké napětí
NP	Nadzemní podlaží
NPV	Čistá současná hodnota
R	Poloměr
VN	Vysoké napětí
aj.	A jiné
Atd.	A tak dále
km	kilometr
Km <sup>2</sup>	Kilometr čtvereční
Km <sup>3</sup>	Kilometr krychlový
kvar	kilo var
kW	kilo Watt
kWh	kilo Watt hodina
l/s	litr za sekundu
m	Metr
m <sup>3</sup> /s	metr krychlový za sekundu
mm	milimetr
např.	Například
řkm	říční kilometr
tj.	To je
°	stupně
%	procento
‰	promile



## Seznam ilustrací

<b>Obrázek 1:</b> Schéma bilance koloběhu vody na Zemi. [2] .....	2
<b>Obrázek 2:</b> Malá vodní elektrárna Spálov. [4] .....	4
<b>Obrázek 3:</b> Ukázka pevného a pohyblivého jezu (zleva). [9] .....	8
<b>Obrázek 4:</b> Ukázka vtokového objektu.[11] .....	9
<b>Obrázek 5:</b> Hrubé a jemné česle. [10] .....	9
<b>Obrázek 6:</b> Ukázka konstrukce stavidla. [10] .....	10
<b>Obrázek 7:</b> Malá vodní elektrárna poháněna vodním kolem na Chrudimsku. [12] .....	11
<b>Obrázek 8:</b> Turgo turbína. [10] .....	12
<b>Obrázek 9:</b> Bánkiho turbína. [10] .....	13
<b>Obrázek 10:</b> Peltonova turbína. [10] .....	14
<b>Obrázek 11:</b> Propelerová turbína. [10] .....	15
<b>Obrázek 12:</b> Francisova horizontální turbína s „mokrou savkou“ [10] .....	16
<b>Obrázek 13:</b> Kaplanova turbína (S – turbína). [10] .....	17
<b>Obrázek 14:</b> Savka přetlakové turbíny. [10] .....	17
<b>Obrázek 15:</b> Ozubené soukolí, řetězový převod, řemenový převod. (zleva) [10] .....	19
<b>Obrázek 16:</b> Vtokový objekt MVE. ....	23
<b>Obrázek 17:</b> Spojení generátoru a turbíny plochým řemenem. ....	24
<b>Obrázek 18:</b> Graf M denních průtoků korytem řeky Bělá. ....	26
<b>Obrázek 19:</b> Účinnost asynchronního motoru v generátorickém chodu. ....	27
<b>Obrázek 20:</b> Porovnání účinností stávající a nové turbíny. ....	31
<b>Obrázek 21:</b> Fullerův trojúhelník.....	35

## Seznam tabulek

<b>Tabulka 1:</b> Rozdělení malých vodních elektráren podle dosažitelného výkonu. [5] .....	5
<b>Tabulka 2:</b> M - denní průtoky .....	25
<b>Tabulka 3:</b> N - leté průtoky velkých vod .....	25
<b>Tabulka 4:</b> Délka odstávky provozu .....	33
<b>Tabulka 5:</b> Investiční náklady.....	33
<b>Tabulka 6:</b> NPV jednotlivých variant. ....	34
<b>Tabulka 7:</b> Doba návratnosti.....	34
<b>Tabulka 8:</b> Vypočtené váhy. ....	35
<b>Tabulka 9:</b> Upravené váhy kritérií. ....	36
<b>Tabulka 10:</b> Bodová stupnice Saatyho metody.....	37
<b>Tabulka 11:</b> Preference dvojic kritérií v Saatyho metodě.....	38
<b>Tabulka 12:</b> Váhy kritérií dle použitých metod.....	39
<b>Tabulka 13:</b> Srovnání výsledků MCA při použití různých metod. ....	41
<b>Tabulka 14:</b> Pořadí variant optimalizace provozu MVE. ....	43

# 1. Úvod

V posledních pětadvaceti letech docházelo na území České Republiky k výraznému nárůstu zájmu o výstavbu a rekonstrukci malých vodních elektráren. Jednalo se především o znovuoobnovení provozu na lokalitách, kde se v dobách minulých vyskytovaly pily, hamry, mlýny a podobné provozy, jež využívaly ke svému pohonu vodní energie. Tento zájem byl částečně způsoben restitucemi a návratem majetku, kdy se majitel rozhodl zužítkovat práce svých předků, ale také vidinou snadného výděлку vzhledem ke garantovaným výkupním cenám a úlevách na dani z příjmu.

Rekonstrukce těchto děl mnohdy probíhaly bez znalosti předchozích provozních podmínek a investor měl jen kusé informace od pamětníků. Z tohoto důvodu snadno docházelo k nevhodným rozhodnutím, ať už při volbě turbíny, generátoru nebo konstrukci dalších částí. Tyto chybné rozhodnutí bohužel často vedou k nevratným škodám, přičemž i nepatrné snížení výkonu se může vzhledem k velikosti investičních nákladů projevit značným prodloužením doby návratnosti.

Ve své bakalářské práci jsem se věnoval návrhu rekonstrukce MVE na řece Bělé v okrese Jeseník, a proto jsem uvítal možnost ověřit provozní vlastnosti nově rekonstruované MVE Domašov na stejném toku. Ta byla po více jak 55 - ti leté odstávce opět uvedena do provozu v roce 2014 novým majitelem bývalé výrobní budovy firmy JESAN. Při rekonstrukci bylo využito původních částí MVE a vzhledem k tomu, že se dochovala i původní Francisova turbína, bylo rozhodnuto, že bude repasována a použita pro novou MVE. Před rekonstrukcí byl vypracován projekt, který předpokládal dobu návratnosti investic do 8 let při průměrné ročné výrobě 87, 4 MWh. Reálná roční výroba se v posledních dvou letech pohybuje okolo 58 MWh. Předmětem této práce bude průzkum lokality a nalezení několika variant optimalizace provozu této MVE, tak aby bylo dosaženo zvýšení roční výroby, a zároveň aby nedošlo k prodloužení doby návratnosti.

Nalezené varianty budou zhodnoceny podle vybraných kritérií a posouzeny pomocí multikriteriální analýzy. Výsledkem bude určení nejvhodnější varianty pro optimalizaci provozu MVE. V závěru zhodnotím dosažené výsledky a problémy na které jsem narazil při řešení této diplomové práce.

## 2. Zdroje vodní energie

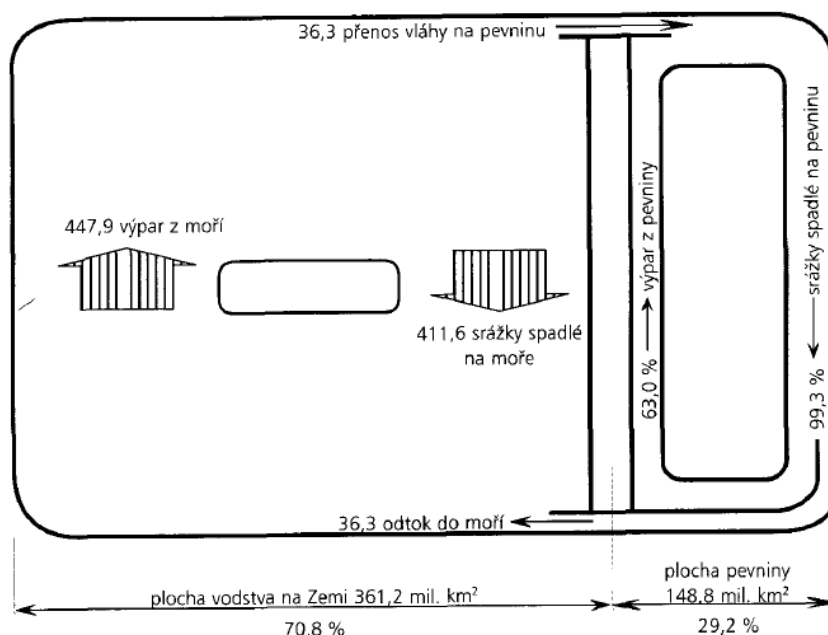
Vznik energie vody neboli vodní energie je způsoben koloběhem vody na Zemi ve spolupráci s působením sluneční energie a gravitační síly Země. Vodní energie se využívá k výrobě elektrické energie ve vodních elektrárnách a to na základě proudění vody, což je kinetická energie, do které spadá rychlost a spád toku a také tlaku vody a energie potenciální, do níž spadá výškový rozdíl hladin a gravitační síly, nebo kombinace těchto dvou veličin. Podle výkonu se rozlišuje, zda jde o malou vodní elektrárnu, nebo velkou vodní elektrárnu. [1]

Voda, která se vyskytuje v přírodě, může být nositelem tří energií. Jsou jimi, energie mechanická, tepelná, nebo chemická.

- Do mechanické energie vod v přírodě spadá:

- Mechanická energie atmosférických srážek – Každoročně zastupují téměř  $100\,000\text{ km}^3$  vody, která spadla na povrch Země. Jejich rozložení je nepravidelné a to plošné i časové a mají malé zhuštění. Díky těmto důvodům se se mohou jen obtížně využívat k výrobě elektrické energie.
- Mechanická energie ledovců – Plocha ledovců na zemském povrchu se pohybuje kolem  $16 \cdot 10^6\text{ km}^2$  a jejich objem je kolem  $21 \cdot 10^6\text{ km}^3$ , což reprezentuje  $18 \cdot 10^6\text{ km}^3$  vody. Mechanická energie u ledovců, které se pohybují, bývá velká, ale nemá praktické využití.
- Mechanická (hydraulická) energie vodních toků – Tato energie je hlavní částí energie vod v přírodě a je technicky využitelná. U průtoků s 95% jistotou překročení se odhaduje potenciální výkon všech řek na světě na  $559 \cdot 10^6\text{ kW}$ .

Pohyb povrchových vod v tocích je součástí koloběhu vody na Zemi viz Obrázek 1. Zdrojem koloběhu je energie slunce, energie toků vody patří k obnovitelným zdrojům energie. Její podíl je na energetickém výsledku zeměkoule poměrně malý – zhruba 0,4 % energie dodané Sluncem na Zem. [2]



**Obrázek 1:** Schéma bilance koloběhu vody na Zemi. [2]

- Mechanická energie moří – Vytváří se vlněním hladiny, které je způsobené větrem, přílivem a odlivem. Vlněním mořské hladiny se představuje obrovská energie, jejichž přeměna v jiný druh energie zatím není realizována. Příliv a odliv se střídá v pravidelném intervalu po 6 hodinách a 12 minutách vlivem gravitačních sil, způsobené zejména Měsícem a Sluncem. Hodnota přílivu a odlivu je v průměru 4 m, ve výjimečných stavech dosahuje až 19,6 m (záliv fundy v Kanadě). Světový výkon se odhaduje na  $1 \cdot 10^9$  kW. Momentálně se energie přílivu a odlivu používá pouze v Kanadě, Francii a Rusku. Od roku 1987 je v provozu doposud největší přílivová vodní elektrárna, která se nazývá Saint Malo a je postavena ve Francii, jejichž výkon je kolem 240 MW a spád je 14,5 m.
- Tepelná energie vod v přírodě se může technicky využívat a to pomocí tepelných čerpadel, ty jsou založeny na principu zvýšení teplotní úrovně tepelného spádu. Výskyt tepelného spádu je možný pouze v tropických mořích, kde je teplota vody na povrchu  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  a v hloubce desítek metrů je teplota vody  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Chemická energie vod v přírodě se projevuje vznikem solných roztoků. Každoročně rozpustí voda  $27 \cdot 10^6$  tun tuhých látek, z čehož vyplývá velká hodnota tohoto druhu přírodní energie. [2]

## 2.1. Vodní elektrárna a její princip

Mezi nejstarší způsoby získávání energie z obnovitelných zdrojů, patří právě získávání energie z vody. Už v dávných dobách se využívalo vodní kolo jako ten nejjednodušší vodní motor. Nejprve byl vodní motor využíván k mechanickému pohonu hamrů mlýnů a pil. Začátkem dvacátého století se začalo plně rozvíjet získávání energie z vodních zdrojů, neboli z vodních elektráren. Rozdíl právě těchto elektráren od klasických vodních mlýnských kol byl v převádění vodní energie na energii elektrickou, ta je v dnešní době lehce přenositelná a přeměnitelná na další druhy energie.

Principem založení vodní elektrárny je přeměna kinetické nebo potencionální energie, která je uložena ve vodních tocích v podobě proudění. Na rychlosti proudění vody, neboli na velikosti využitelného spádu a na průtoku v daném úseku toku je závislá velikost získané energie. Spád vodního toku můžeme považovat za konstantou, kterou nám určuje daný tvar terénu a průtok je proměnná veličina, která je v první řadě závislá na počasí v místních poměrech, kde se nachází vodní elektrárna. Velice důležité je místo postavení vodní elektrárny, v horách a na vysočině můžeme získat za krátkou dobu dostatečný spád a tím i dobrý výkon i na tocích s malým průtokem. Naopak v nížinách se setkáváme s pomalu tekoucí vodou, která má velký průtok, zde není možné zajistit velký spád.

U vodních děl, které mají akumulaci vody, musí být použit největší možný spád. Dojde tím ke snížení množství vody potřebnou k nashromáždění a nádrž tak může mít menší rozměry. Je-li to možné a dovolují to okolnosti, tak místo pro postavení vodní elektrárny je zvoleno blízko terénní nerovnosti, kde prudčeji klesá přírodní vodní tok (prudký ohyb, skalní práh, peřeje), místo odběru je nad tímto místem a voda je vrací až pod ním. Tím se ušetří hodně metrů náhonu a v cíli bude stejný spád.

Potenciální energie vzniká získáním vody o větší výšce, z níž proudí voda do místa s nižší hladinou. Tento rozdíl vytváří tlak, ten je využíván v přetlakových strojích jakou jsou např. turbíny typu Kaplan, Francis, Reiffenstein, turbíny vrtulové. V přetlakové turbíně se část tlaku vody přemění na rychlost pro zajištění požadovaného průtoku, zbývající tlak se při průchodu lopatkou turbíny postupně

snižuje a v místě, kde ji opouští, je prakticky využit. Otáčky oběžného kola přetlakové turbíny jsou mnohokrát vyšší, než je absolutní rychlost proudění.

Kinetickou energii vody je možno využít vodními rovnotlakovými stroji, které jsou principiálně založeny na rotaci, jsou jimi např. Peltonova turbína a vodní kola. K optimálnímu využití je vyžadována nižší obvodová rychlost stroje, před rychlostí proudění, jinak dochází k tomu, že lopatky pouze ustupují proudu a nemají možnost zatížení a převzetí energie. U rovnotlakových strojů jsou pomalé otáčky, voda vstupuje do turbíny pouze v některých částech jejího obvodu. Tlak na lopatky, který je způsobený poloviční obvodovou rychlostí oproti rychlosti proudění, je po celé ploše předávání energie stejný. [3]



**Obrázek 2:** Malá vodní elektrárna Spálov. [4]

## **2.2. Rozdělení vodních elektráren**

Vodní elektrárny je možno rozdělit podle různých aspektů. Podle normy s označením ČSN 75 0120 „Vodní hospodářství – Terminologie hydrotechniky“ a normy s označením ČSN 75 2601 „Malé vodní elektrárny – Základní požadavky“ jsou vodní elektrárny následně rozděleny.

- **Podle instalovaného výkonu**

1. Malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 10 MW.
2. Střední vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 10 MW do 200 MW.
3. Velké vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 200 MW.

Ad. 1: Malé vodní elektrárny se dělí na:

- Domácí vodní elektrárny s instalovaným výkonem do 35 kW.
- Vodní mikroeletřárny s instalovaným výkonem od 35 kW do 100 kW.
- Vodní minielektrárny s instalovaným výkonem od 100 kW do 1000 kW.
- Průmyslové vodní elektrárny s instalovaným výkonem od 1 MW do 10 MW.

Dle normy s označením ČSN 75 2601 jsou malé vodní elektrárny rozděleny podle dosažitelného výkonu do 4 kategorií. [5]

**Tabulka 1:** Rozdělení malých vodních elektráren podle dosažitelného výkonu. [5]

Kategorie MVE	Výkon MVE
<b>I a</b>	Nad 1000 [kW]
<b>I b</b>	Nad 500 [kW] do 1000 [kW]
<b>II</b>	Nad 100 [kW] do 500 [kW]
<b>III</b>	Nad 35 [kW] do 100 [kW]
<b>IV</b>	Do 35 [kW]

- **Podle získaného spádu**

- Přehradová vodní elektrárna, jejíž spád je tvořen přehradou.
- Derivační vodní elektrárna, využívající soustředěného spádu získaného derivací vody, (umělým vedením vody mimo vodní tok pomocí tlakové nebo beztlakové derivace).
- Jezová vodní elektrárna, jejíž spád je vytvářený jezem.
- Vodní elektrárna bez vzdouvací stavby, využívající energie vody proudící v potrubí, v otevřených korytech vodních toků, kanálech apod..

- **Podle charakteru pracovního režimu**

- Průtočné, pracující bez ovlivnění přirozeného průtoku.
- Akumulační, pracující s řízeným odběrem vody z akumulací nádrže vytvářející spád.

- **Podle umístění strojovny**

- Hrázová vodní elektrárna, jejíž strojovna je umístěna u hráze, v tělese hráze nebo v přelivných blocích.
- Plovoucí vodní elektrárna, jejíž soustrojí je umístěno na pontonu nebo jiném plovoucím zařízení.
- Pilířová vodní elektrárna, jejíž soustrojí jsou umístěna v pilířích přelévané hráze nebo jezu.
- Členěná vodní elektrárna, která má strojovnu rozdělenou na dvě nebo více částí, nejčastěji po obou březích vodního toku.
- Břehová vodní elektrárna, umístěna u jezu v jeho břehové části.
- Jezová vodní elektrárna, jejíž strojovna je umístěna při jezu, v jeho těsné blízkosti nebo přímo ve spodní stavbě.
- Individuální vodní elektrárna, jejíž strojovna je umístěna v rekonstruovaném objektu bývalého mlýna, pily.

- **Podle uspořádání strojovny**

- Přelévaná vodní elektrárna se strojovnou umístěnou pod přelivy jezu nebo hráze.
- Krytá vodní elektrárna se zakrytým prostorem strojovny.
- Polokrytá vodní elektrárna s minimální výškou strojovny bez montážního prostoru.
- Nekrytá vodní elektrárna bez budovy strojovny.

- Sdružená vodní elektrárna, v jejíž spodní stavbě jsou umístěny nejen hlavní soustrojí a zařízení vodní elektrárny, ale i spodní výpusti.

- **Podle velikosti spádu**

- Nízkotlaké vodní elektrárny, využívající spád do 20 m.
- Středotlaké vodní elektrárny, využívající spád nad 20 m do 100 m.
- Vysokotlaké vodní elektrárny, využívající spád nad 100 m.

- **Podle řízení provozu**

- Vodní elektrárny s ručním ovládáním, jejichž provoz je řízen výhradně obsluhou.
- Automatizované vodní elektrárny, jejichž provoz je řízen výhradně automatikou.
- Částečně automatizované vodní elektrárny, jejichž provoz strojně je řízen částečně automatikou, částečně obsluhou. [5]

## 2.3. Význam vodních elektráren pro energetiku v ČR

Význam vodních elektráren v ČR není vztahován k množství získané energie, nýbrž jejich význam je ukryt ve specifických vlastnostech jejich provozu. Rychle dokáží reagovat na okamžitou spotřebu elektrické energie, pro životní prostředí nemají žádnou zátěž v podobě odpadu a s tím odpadá i povinnost vybudování úložiště zbylého odpadu. Díky jejich obnovitelnosti jsou vodní elektrárny označovány jako levný zdroj elektrické energie. Přecherňavající vodní elektrárny umožňují i využití elektřiny, která je produkována slabšími energetickými zdroji a to i v období, kdy je spotřeba energie nízká. K nejznámějším typům vodních elektráren patří kromě průtokových, taky akumulací. Tyto vodní elektrárny, kromě akumulace vody k výrobě elektrické energie zrovnoměňují průtoky říční korytem, poskytují ochranu před povodňovými vlnami. Jendou z důležitých vlastností vodních elektráren je jejich schopnost okamžitě řešit zvýšenou spotřebu elektrické energie. Vzniklou energii sice nelze v čistém stavu skladovat, ale díky přecherňavacím vodním elektrárnám lze vzniklou situaci vyřešit. Principiálně pracuje přecherňavající elektrárna tak, že jsou nad sebou výškově postaveny dvě vodní nádrže, které jsou spojeny tlakovým potrubím, na jehož dolní části je umístěna turbína s generátorem. Ta vyrábí elektřinu pro elektrizační soustavu v době energetické špičky, v době útlumu se voda a dolní nádrže přecherňává do horní nádrže. Na každou akumulovanou kWh, která je odebrána z přecherňavající elektrárny, je nutné k načerpání vody do horní nádrže vydat přibližně 1,4 kWh. Princip přecherňavacích vodních elektráren a jejich technologie je velice perspektivní a to především díky již zmíněné akumulaci energie. [6]

## 2.4. Výhody a nevýhody vodních elektráren

Prioritně největší výhodou vodních elektráren je jejich využití alternativních neboli obnovitelných zdrojů energie. Jsou šetrné k životnímu prostředí, protože nejsou závislé na chemických zdrojích, nevytváří žádný odpad. Jejich provoz minimálně znečišťuje životní prostředí a okolí elektrárny. Nekladou velký důraz na odsluhu a údržbu. Dokáží se rychle uvést do provozu a pracovat jako okamžitý zdroj energie v době energetických špiček. K nevýhodám velkých vodních elektráren



patří nutnost vybudování přehradní nádrže. Vybudování přehrady vyžaduje zatopení velké části území, následkem je změna krajinného rázu a změna ekosystému. Z tohoto zřetele je nejvíce nejasná přečerpávající elektrárna Dlouhé Stráně v Jeseníkách, její horní nádrž je umístěna přímo na vrcholu kopce. Odborníci tuto nádrž často hatí, nicméně v roce 2005 byla veřejností začleněna do 7 divů České republiky. K další nevýhodě patří závislost na stabilním průtoku vody, to bývá problémem zejména u malých vodních elektráren. Zde je také problém s nedostatkem vhodných lokalit pro jejich výstavbu. Na většině vhodných místech již většinou elektrárny stojí, ale stává se, že jsou zastaralé a práce rekonstrukcí malých vodních elektráren je cestou k zefektivnění potenciálu toků a podílení se na výrobě čisté elektrické energie. [2]

## **2.5. Podíl MVE na energetické bilanci ČR**

Získaná energie z vodních toků sice není v žebříčku naší energetiky rozhodující ani výrazná, ale zůstává cenným obnovitelným zdrojem. Vodní elektrárny se podílejí na celkové výrobě elektřiny necelými 3% z tohoto množství je vyrobeno v MVE do výkonu 10 MW 47%. Využitelný potenciál řek v České republice činí 3380 GWh/rok. Z toho je pro MVE počítaný využitý potenciál 1570 GWh/rok.

V České republice by měl být podle nejnovějších průzkumů ještě dostatek vhodným lokalit pro výstavbu, nebo obnovu MVE. MVE jsou u nás nezastupitelné z dispozice o rozložení zdrojů vodní energie, protože jsou rozloženy po celém území republiky. Je to vhodné převážně pro připojení do energetické sítě, kde nezatěžují přenosovou soustavu. Celoplošné rozšíření elektrizační soustavy pak umožňuje připojení téměř ve všech lokalitách a to s možností využití asynchronních generátorů, ty jsou jednodušší a levnější v závislosti na provozu, protože není třeba složitých a nákladných regulačních částí. Dle statistik vyzdvihuje MVE fakt, že jejich ekonomické ukazatele byly stejné, ba i lepší a tím výhodnější než ukazatele jiných energetických zdrojů. MVE se vyznačují dlouhou životností, ta je podstatně delší než doba návratnosti investovaných peněžních prostředků na její vybudování a zprovoznění. Tím pádem sedá říct, že výroba elektrické energie z MVE je jedna z nejlevnějších. [7]

## **2.6. Základní části vodního díla**

- MVE se skládá z těchto základních částí:
  - Vzdouvací objekty – jezy
  - Vtokové objekty
  - Česle
  - Stavidla
  - Přivaděče a odpady
  - Strojovna

- Dále se strojovna MVE dělí na:
  - Vodní motory – turbíny
  - Převody
  - Elektrotechnická část

### 2.6.1. Jezy

Jezy slouží všeobecně z vzdutí hladiny toku na požadovanou výšku. U vodních elektráren je výška vzdutí hladiny toku stejně velká jako hladina vody, která vtéká do náhonu nebo voda, která přímo vtéká na turbínu, u jezových vodních elektráren.

Stavebně, konstrukčně a funkčně, lze jezové konstrukce rozdělit do dvou základních skupin, kterými jsou:

- **Pevné jezy** – Ty vzdouvají vodní hladinu vlastním tělesem, proto není vhodné je požívat při vzdouvání hladiny do větší výšky. Při povodňové vlně by se voda, která je nad jezem mohla vylít z břehů.
- **Pohyblivé jezy** – V současnosti při výstavbě MVE v nových lokalitách jsou právě pohyblivé jezy preferovanější, protože konstrukce je tvořena masivní spodní stavbou, která je rozdělena jezovými pilíři na jednotlivá pole, hrazená pohyblivými jezovými uzávěry. Při malé šířce jezu, je možnost použití pouze jednoho jezového pole. Výběr druhu jezového uzávěru je ovlivněn několika faktory: (vzdutí, šířka jezových polí, výška, statistické a hydraulické požadavky, atd.).

V závislosti na použitém materiálu se následně může jednat od jezy dřevěné, betonové nebo zděné z kamene. V dnešní době se s dřevěnými jezy setkáme pouze výjimečně, protože jsou velice nákladné na údržbu a mají nižší životnost než zbylé dva druhy. [8]



**Obrázek 3:** Ukázka pevného a pohyblivého jezu (zleva). [9]

### 2.6.2. Vtokové objekty

U každé vodní elektrárny se nachází vtokové objekty. Mají za úkol zajišťování přítoku vody na vodní turbíny a to s nejmenšími ztrátami, ale zároveň co největší hltlost tokového objektu.

Z hlediska poměrů tlaků ve vtokovém objektu, je možno rozdělit vtoky na tlakové a beztlakové. Tlakové vtokové objekty slouží k odběru vody a to buď do tlakového přiváděče, nebo přímo na turbíny. Beztlakové vtokové objekty slouží pro odběr vody do beztlakových přiváděčů vody, nebo jako předložená část tlakových přiváděčů. [8]



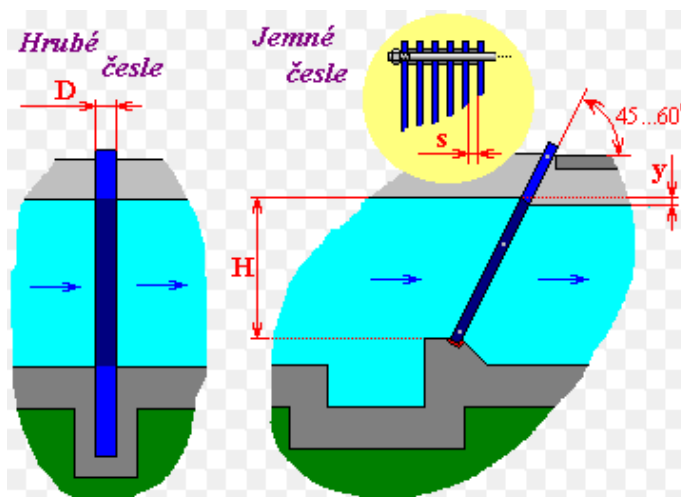
**Obrázek 4:** Ukázka vtokového objektu.[11]

### 2.6.3. Česle

Česle patří důležité součásti vtokových objektů. Slouží k oddělení plovoucích splavenin, které by mohly při svém průchodu na turbíny poškodit jejich oběžné nebo rozváděcí lopatky, nebo by mohly při uchycení na lopatkách turbíny změnit povahu obtékání a proudění lopatek turbín a tím by došlo k významnému snížení výkonu. Převážně se u vodních elektráren objevují česle hrubé a jemné.

Hrubé česle je součástí odběrného objektu a zabraňuje vniknutí splavenin do hydraulického systému vodní elektrárny (zejména ledové kry, plovoucí stromy aj.). Nejčastěji jsou navrhovány jako svislá mřížovina s mezerami mezi jednotlivými česlicemi 300 až 600 mm.

Jemné česle tvoří další zábranu proti vniku nežádoucích splavenin do turbíny. Navrhují se ve sklonu  $45^\circ$  až  $70^\circ$ , to přispívá k jejich snadnému čištění a to vyhrnováním nečistot směrem nahoru.[8]

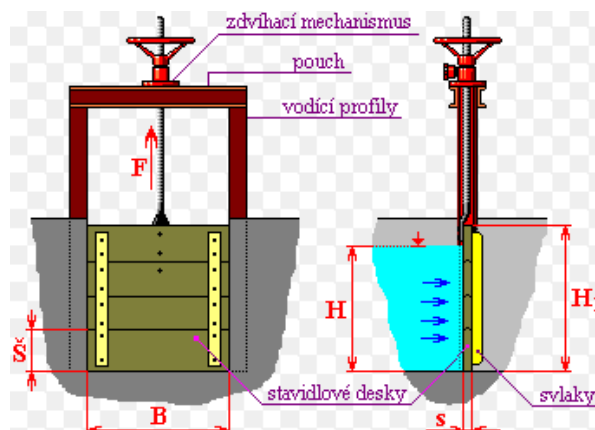


**Obrázek 5:** Hrubé a jemné česle. [10]

### 2.6.4. Stavidlo

Používá se od pradávna a patří k jednoduchým vodním uzavěrům. Slouží k omezení průtoku, regulaci průtoku, nebo k úplnému zastavení průtoku. Podle konstrukce, umístění a provedení je možnost jeho zastoupení při funkci přepadu či jezu. Nejčastěji se v současné době zhotovuje stavidlo z ocelových plátů, které jsou umístěny do betonového koryta. Tyto pláty jsou ošetřeny proti korozi. U rybníků a

některých MVE se můžeme setkat se starou dřevěnou konstrukcí stavidla. Většina novodobých stavidel je opatřena malým elektromotorem, který slouží k jejímu zdvihání, starší typy mají jednoduchý ruční zdvihací mechanismus. [8]



Obrázek 6: Ukázka konstrukce stavidla. [10]

### 2.6.5. Přivaděče a odpady

Úkolem je dopravení vody k vodnímu motoru a odvod vody po momentu, kdy mu předala svoji energii. Obvykle je k dispozici dostatek energie k převodu vody na vodní elektrárnu. Při odvodu od elektrárny je k dispozici pouze ta energie, která zbyla po využití původní energie vodními turbínami.

Při navrhování přivaděčů i odpadů, je na místě postupovat tak aby došlo k co nejmenšímu spotřebování energie. Z konstrukčního pohledu mohou být rozděleny přivaděče a odpady na náhony, žlaby, kanály, štoly, šachty a potrubí. A podle poměrů tlaku na tlakové a beztlakové. Většinou se k dosažení maximálního spádu a minimálních nákladů oba typy přivaděčů kombinují.

Tlakové přivaděče jsou ve většině případů zhotoveny z ocelových trub nebo také z železobetonových skruží. Měrné náklady na jejich výstavbu jsou vyšší než u beztlakových přivaděčů (náhonů) a to především u horských a podhorských toků. Z ekonomického hlediska mohou být při velkém podélném spádu toku výhodnější než beztlakové, proto je při jejich realizaci kladen důraz na délku (čím kratší tím lepší).

Beztlakové přivaděče (náhony, kanály) jsou budovány většinou výkopem v terénu. Náklady jsou závislé na délce, typu zeminy a s tím i souvisejícího druhu opevnění stěn koryta a v poslední řadě jsou závislé na příčné svažitosti terénu. [8]

### 2.6.6. Vodní motory a jejich dělení

Vodní motory, které jsou používány u MVE mohou být rozděleny podle různých hledisek. Podle základního dělení, se vodní stroje dělí na vodní kola, turbíny a ostatní vodní stroje. Každý typ motoru má své specifické vlastnosti. K nejtěžšímu úkolu projektanta MVE patří výběr správného typu vodního motoru, protože neexistuje žádný typ univerzální turbíny, které by se daly použít na všechny lokality. Také mínění, že vodní kolo je horší, než turbína není správné. Všechno je odvíjeno od konkrétní lokality výstavby MVE, dále na způsobu provozu a druhu stroje, kterým je vodní motor poháněn. Častým rozhodujícím faktorem je finanční náklad.

- **Vodní kola**

Vodní kola se dále dělí podle způsobu využívání vodní energie a to na korečková a lopatková. V dnešní době je vodní kolo již považováno za historický vodní motor, který může najít uplatnění a to zejména pro spády do 1m a průtoky až do několika  $\text{m}^3/\text{s}$ , je vhodný jako vodní motor při rekonstruování historických objektů. Je to jeden z nejstarších strojů využívaných člověkem. Jedná se o pomaloběžný motorek, kde se mění polohová nebo kinetická energie na energii mechanickou. Energie je dále pomocí generátoru a převodníku měněna na energii elektrickou. Vodní kolo je spolehlivé, levné a nenáročný hnací motor. Má velký přínos pro ekologii a to výrazným okysličením vody při plnění korečků a následném výpadu vody. Vodní kola dokáží lépe využít příval velké vody než turbíny. Špatnou vlastností je jejich zamrzání v zimním období a to jejich zastavení přes den nebo v noci. K zamezení tohoto stavu se dá předejít pouze tak, že je celé vodní kolo uzavřeno ve zděném nebo dřevěném domečku, který se nazývá lednice. Voda, která teče tak udržuje v zimě i létě stále konstantní teplotu a dřevěné kolo neschne ani nenamrzá. Vlastní šířka kola je závislá pouze na průtoku, znakem výpočtů všech vodních kol je skutečnost je rozměry korečku, tvary lopatek a průměry jsou závislé na spádu. Snadno se přepočítává na jiný průtok, naopak od turbíny, kde se s drobnou změnou, jakéhokoliv základního parametru změni většina konstrukčních rozměrů. [10]



**Obrázek 7:** Malá vodní elektrárna poháněna vodním kolem na Chrudimsku. [12]

- **Turbíny**

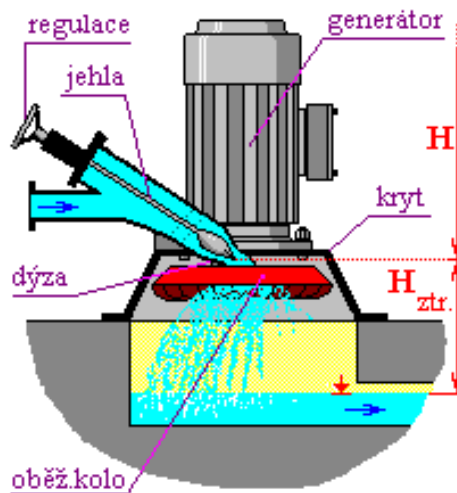
Vodní turbíny mohou být rozlišovány podle různých hledisek. Základní dělení je dělení podle způsobu přenosu vody. Dále se mohou turbíny dělit podle způsobu využívání vodní energie a to na akční neboli rovnotlaké a reakční neboli přetlakové.

V současnosti při výstavbě MVE jsou používány následující typy turbín:

- Akční (rovnotlaké) – Turgo turbína, Bánkiho turbína, Peltonova turbína.

**Turgo turbína:**

Jedná se o rovnotlakovou turbínu s parciálním ostřikem. Jejichž účinnost je 85 až 90%. K turbíně je voda přiváděna kruhovým potrubím, to vede k jedné nebo více dýzám. Dýzy jsou umístěné šikmo, mají kruhový průřez a celý spád vody se zde transformuje na pohybovou energii. Voda vstupuje šikmo do oběžného kola, to je tvořeno dvěma prstenci, mezi nimiž jsou zakřivené lopatky. Lopatky mají za úkol otáčení směru tekoucí vody, změna směru vody způsobí předání energie oběžnému kolu. Je nutno dbát dodržení jmenovitých otáček, při nedodržení ztrácí turbína na účinnosti. Její chod nesmí být spuštěn bez zátěže, většinou se staví jako vertikální a reguluje zasouvání jehly do dýzy, ovšem k úplnému zastavení příkonu je používáno šoupátko, které je umístěné na přívodním potrubí. Používá se pro malé množství vody při velkých spádech. Má podobné vlastnosti jako Peltonova turbína, ale je konstrukčně jednodušší, levnější a není technologicky náročná. Vhodná je pro pohon asynchronních a také synchronních generátorů. Na menších spádech dává turbína menší počet otáček a vyžaduje převod. Nevýhodou turbíny je právě část ztraceného spádu. [10]



**Obrázek 8:** Turgo turbína. [10]

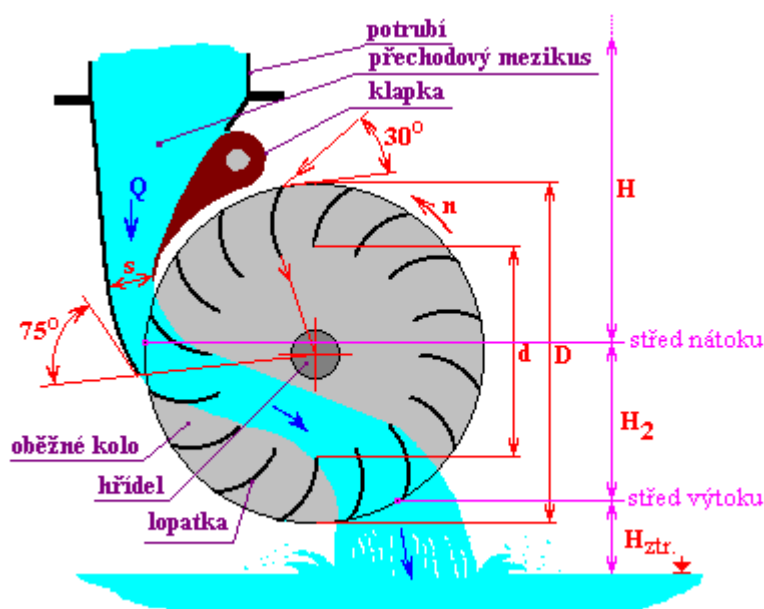
**Bánkiho turbína:**

Jedná se o jednoduchou příčně dvojnásobně protékanou turbínu, není náročná na výboru. Jejichž účinnost dosahuje 78 až 84%. K turbíně je voda přiváděna kruhovým potrubím. Před turbínou je mezikus, ten mění kruhový průřez na obdélný. Na konci je umístěna regulační část, kterou nejčastěji bývá klapka. Mezi zakřivenou stěnou a klapkou se celý spád vody přemění na pohybovou energii. Voda



vstoupí tečně do oběžného kola, které je hustě osazeno dlouhými lopatkami. Ty se snaží odklonit směr tekoucí vody a to do středu kola k hřídeli. Změnou směru dojde k předání energie oběžnému kolu. Lopatky oběžného kola jsou obtékány ve dvou směrech. Při prvním průtoku lopatkami je turbíně předáno asi 79% z celkového výkonu. Vlivem souběhu mezi rychlostí vody a otáčením kola nemíří vytékající paprsek na hřídel turbíny, ale mine jej volným zavzdušněným prostorem. Následně vstoupí do lopatek na protější straně lopatkového věnce. Voda musí změnit směr a lopatkám předá další díl své energie, která odpovídá 21% z celkového výkonu turbíny. Následně voda jakmile opustí lopatkový věnec, začne volně vytékat pod oběžné kolo.

Turbína tohoto typu má široké využití, ale je vhodná pouze v případě když je průměr 5x až 10x menší než spád. Není vhodná v lokalitách kde je ohrožení vzestupu spodní vody. K jejímu sestrojení není potřeba žádných speciálních materiálů. Výrazně se podílí na okysličení vody, dá se snadno a rychle regulovat a je odolná proti abrazi pískem. Minimální počet lopatek je 28 kusů, je doporučeno minimálně 32 kusů. Náběžná hrana lopatky je přiosťřena a s tečnou svírá úhel  $30^\circ$ . Turbína se většinou staví jako horizontální. Nestaví se pro spády, které jsou menší než 2 metry. [10]

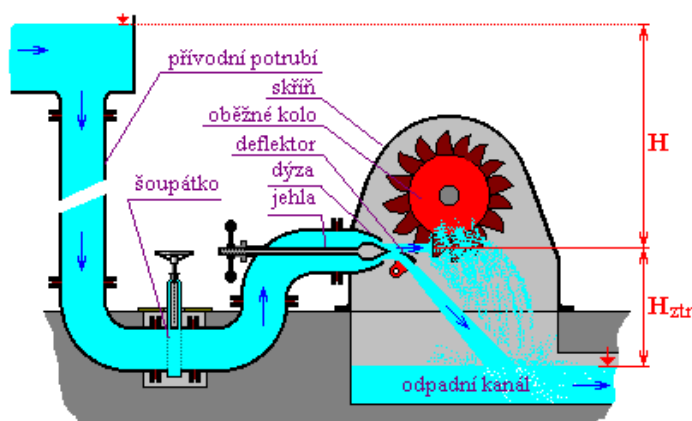


Obrázek 9: Bánkiho turbína. [10]

#### Peltonova turbína:

Jedná se o rovnotlakovou turbínu, která je vhodná pro spády nad 30 metrů. Jejichž účinnost dosahuje u malé turbíny 80 – 85% a u velké turbíny dosahuje 85 – 95%. K turbíně je voda přiváděna kruhovými potrubími, to vede k jedné nebo více dýzám. V dýze, která má kruhový průřez se celý spád vody přemění na pohybovou energii. Voda vstoupí do oběžného kola, které je celé osazeno lžicovými lopatkami. Lžicové lopatky se snaží o směnu směru vody, následná změna směru způsobí předání energie oběžnému kolu. Počet lopatek se pohybuje od 18 do 26 kusů. Turbína ústí bez savky volně do odpadu, není třeba utěsnění prostupu hřídele ze skříně, ale je opatřen odšťikovými kroužky, aby voda nestékala po hřídeli do ložisek. Většinou se turbína staví jako horizontální, u velkých strojů může být i vertikální montáž. Reguluje zasouvání jehly do dýzy, ovšem k úplnému zastavení příkonu je používáno šoupátko, které je umístěné na přívodním potrubí. Používá se pro malé množství vody při velkých

spádech, má podobné vlastnosti jako Turgo turbína. Není náchylná ke kavitaci. Je možno pracovat i s pitnou vodou bez obavy o znečištění, protože ložiska jsou umístěna mimo vodu. Přidáním dýz je možno zvětšit její hltlost. Její použití je na území České republiky omezená. Turbína má průtoky, které jsou využitelné od  $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  ( $10 \text{ l/s}$ ). Levnější náhradou mohou být v některých případech sériově vyráběná odstředivá čerpadla v reverzním chodu. [10]



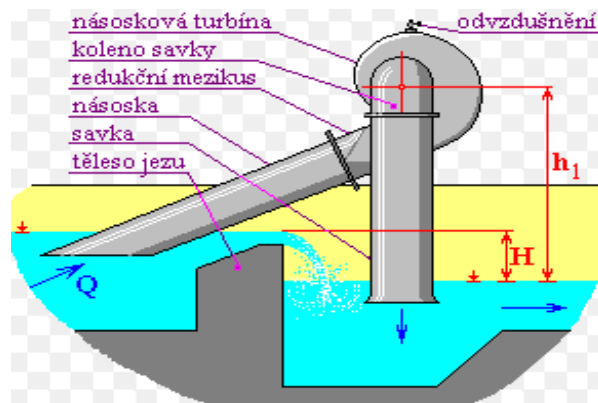
Obrázek 10: Peltonova turbína. [10]

- Reakční (přetlakové) – Propelerová turbína (vrtulová turbína), Francisova turbína, Kaplanova turbína

#### **Propelerová turbína (vrtulová turbína):**

Velmi často je potřeba jednoduchý a hlavně spolehlivý záložní zdroj energie, buď v případě výpadku elektrické energie pro řídicí elektroniku, nebo pouze pro rozsvícení nouzových kontrollek. Malé pomocné motory jsou napojeny na společný zdroj vody s turbínou a jejich práce je pod stálou zátěží. Jejich konstrukce je jednoduchá, jde o vrtulové turbíny, které neumožňují jejich regulaci, jsou opatřeny pouze hlavním uzávěrem, který je určený k absolutnímu zastavení. V dnešní době se vyskytují pouze ojediněle. Turbína je opatřena pěti rozváděcími lopatkami, s velkými mezerami, aby nedošlo k zanášení mezilopátkových kanálů. Oběžné kolo je opatřeno čtyřmi masivními odlitými lopatkami. Hřídel od oběžného kola pokračuje kolem savky a v jeho zadní části vychází do strojovny přes provazcovou ucpávku. Těsně za ucpávkou následuje řemenice na plochý řemen. Voda pokračuje přes turbínu do vývěřiště, to je společné s hlavní turbínou. [10]



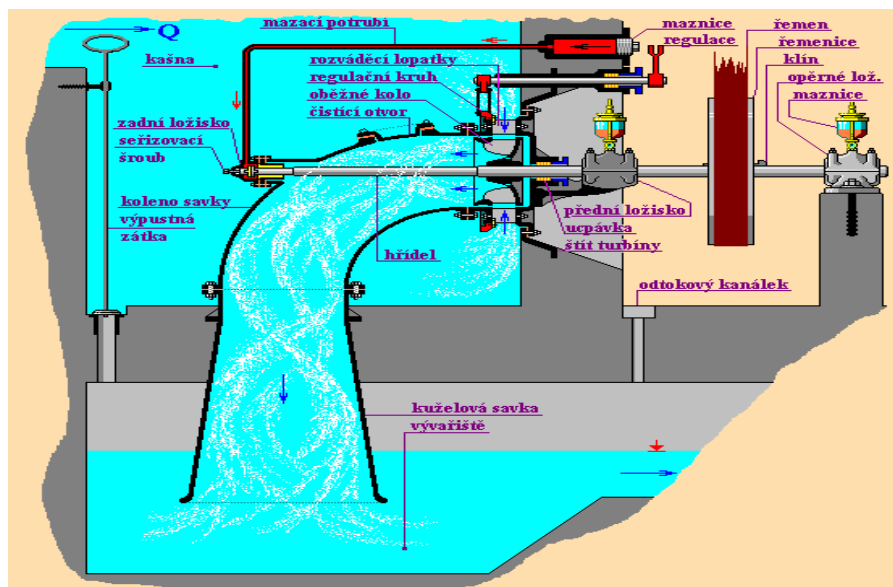


Obrázek 11: Propelerová turbína. [10]

### Francisova turbína:

V minulosti byla nejvíce používanou přetlakovou turbínou pro skoro celou oblast spádů a průtoků Malých vodních elektráren. Je možno ji rekonstruovat již od spádu 0,8 metrů. V dnešní době je instalace nových turbín MVE omezena od spádu 10 metrů a pro větší průtoky. Dělí se na vertikální turbínu a kašnovou horizontální turbínu.

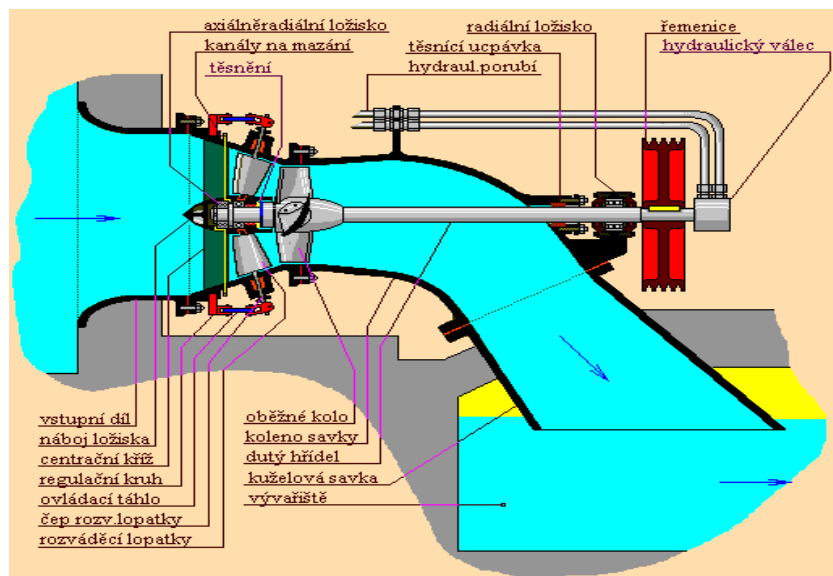
- **Vertikální turbína:** Většinou jí byla osazena jezová vodní díla, nebo derivační vodní díla s otevřeným přivaděčem v nížinách na větších řekách. Nejčastěji byla používána jako hlavní mechanický pohon u větších mlýnů, průmyslových závodů a městských elektráren. Její vlastní turbína leží na dně turbínové kašny, která je naplněna vodou. Hřídel je vyvedena svisle vzhůru do strojovny, ta je znatelně vysoko nad spodní vodou. Voda se dostává z kašny do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny. Jakmile projde rozváděcími lopatkami, získá rychlost s potřebný směr pro vstup do oběžného kola. V zakřivených mezilopatkových kanálech oběžného kola změní voda směr i rychlost a tím dochází k předání její energie. K regulaci turbíny je použit regulační okruh, kterým se ovládá náklon rozváděcích lopatek.
- **Kašnová horizontální turbína:** Používá se u spádu od 2 do 8 metrů při malých a středních průtocích. Turbína má nižší účinnost než turbína vertikální. Mezi největší výhodu kašnovité turbíny patří vodorovný hřídel, který vychází přímo z turbíny do strojovny a tím zjednodušuje převody. Vlastní turbína je umístěna ve stěně turbínové kašny, která je naplněna vodou. Osa je znatelně vysoko nad spodní vodou, aby nedošlo k zaplavení stroje. Voda se dostává z kašny do regulovatelných rozváděcích lopatek po celém obvodu turbíny. Jakmile projde rozváděcími lopatkami, získá rychlost s potřebný směr pro vstup do oběžného kola. V oběžném kole voda předá energii a odvádí se do odpadního kanálu. [10]



**Obrázek 12:** Francisova horizontální turbína s „mokrou savkou“ [10]

#### **Kaplanova turbína (S – turbína):**

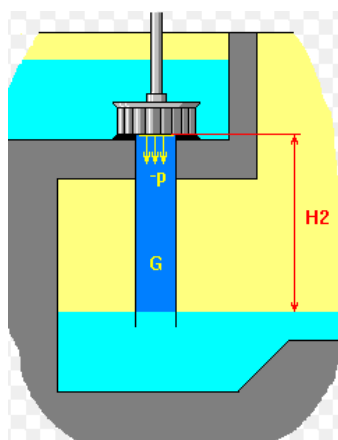
V současné době patří k nejčastěji rekonstruovaným hnacím strojům u malo spádových vodních elektráren. Jedná se o klasickou přetlakovou turbínu v základním provedení, dá se dobře regulovat, ale je náročná na výrobu. Používají se pro spády od 1 do 20 metrů s průtoky od 0,15 m<sup>3</sup>/s až několik desítek m<sup>3</sup>/s. Je vhodná tak, kde jsou jezové a malé vodní elektrárny s kolísavým průtokem. Dále se používá při přestavbách starých vodních děl. Název je odvozen od esovité tvarované savky. Je používána k pohonu generátorů, především asynchronních, dá se dobře regulovat, proto se může použít i u synchronního generátoru. Jsou málo finančně nákladné. U menších turbín je převod ke generátoru řemenový, u větších strojů je opatřen ozubeným čelním soukolím v samostatné uzavřené převodovce. Přímě s generátorem jsou spojeny pouze turbíny na větších spádech. K velké výhodě patří malá stavební výška. Nevýhodou je vysoká cena s i vysoké náklady spojené s údržbou. Proto je vhodné tyto turbíny instalovat pouze v oblastech, kde není možnost akumulace vody, kde je průtok vody tak značně rozkolísaný, že by použití jednodušších typů strojů přinášelo velké ztráty. Voda vtéká do difuzéru stroje, ten se kuželovitě zužuje, tím dojde k zvýšení rychlosti vody. Lopatky upraví směr a rychlost vody pro vstup do oběžného kola. To je umístěno nejužším průřezem celého stroje. Počet lopatek je sudý, přičemž nejčastěji jsou čtyři. Voda opouští oběžné kolo se značnou zbytkovou energií, ta je využívána savkou turbíny a následně přeměňována na zápornou tlakovou energii, která podporuje průtok vody strojem. [10]



**Obrázek 13:** Kaplanova turbína (S – turbína). [10]

- **Savky přetlakových turbín**

Savka neboli sací roura se vyskytuje většinou u přetlakových turbín. U turbín rovnotlakových je označována jako odpadní potrubí. Savka je to, pouze pokud je za oběžným kolem vytvořený podtlak. Savka se stará o spoj mezi odtokovou turbínou se spodní vodou. Po prvním spuštění turbíny úplně napuštěna vodou, chová se v ní sloupec kapaliny spojitě. Za provozu turbína zpracovává jak přetlak, tak i podtlak, který vzniká působením sloupce od oběžného kola ke spodní hladině. I když je stroj postaven vodorovně může je voda od něj odvádět kolenem. Kolenová savka umožňuje jakoukoliv výšku při stejném spádu. Dokáže správně zužitkovat energii, která by jinak unikala. S velkou hnací rychlostí opustí voda oběžné kolo, a jakmile se dostane zbytková energie mimo dosah lopatek, tak se dá říci, že je nepoužitelná. Pokud ovšem bude použita za oběžným kolem rozšiřující savka. Odpadní voda, která proudí kuželem je nucena zaujímat větší průřez. Ve větším průřezu musí kapalina proudit pomaleji, ale setrvačná síla je žene dál. Voda se v tu chvíli chová jako píst. Za kapalinou, která odtekla, se projevuje značný podtlak, ten je sloupcem vody přenášen až na lopatky oběžného kola. [10]



**Obrázek 14:** Savka přetlakové turbíny. [10]

### 2.6.7. Převody

Převody jsou důležitou součástí vodní elektrárny a to z hlediska technologického vybavení. U velkých soustrojí bývá zajištěno přenosu mechanické energie spojením hřídele turbíny přímo s generátorem, ten bývá většinou konstruován přímo na otáčky turbíny.

U malých vodních elektráren bývá jako generátor většinou použit asynchronní motor s velkými otáčkami. Proto je nutností jej použít ke spojení rotujícího hřídele turbíny nebo vodního kola s generátorem převodu. U převodu jsou kladeny vysoké požadavky na provozní spolehlivost, dlouhou životnost, malé prostorové nároky, malá náročnost údržby a vysoká účinnost.

Jako převodové ústrojí je možno použít následujících druhů: Ozubená soukolí, lanové převody, řetězové převody, řemenové převody.

- **Ozubená soukolí:**

Ozubeními koly je možno přenášet velké krouticí momenty a jednoho hřídele na hřídel druhý a to i v případě malých otáček. Ozubeným převodem dosáhneme stálého převodového poměru. Zuby jednoho kola zapadají do mezer kola druhého, boky těchto zubů se o sebe opírají a tím dochází k přenášení síly. Ozubená kola, která spolu zabírají tvoří soukolí, od toho je také odvozen název. Jejich použití je u většiny vodních elektráren s nízkým spádem. V minulosti byla používána soukolí dřevěná nebo ocelová. Dřevo se neosvědčilo jako správný materiál pro konstrukci ozubených převodů, protože není dostatečně pevné a snadněji se opotřebovává. Většinou se u vodních elektráren používají čelní ozubení nebo kuželová. Podle druhu ozubení se dá rozlišit, o jaké zuby jde (přímé, šikmé, šípové).

Kuželová ozubení mají buď protínající se osy, nebo jsou osy mimoběžné, avšak nejčastěji svírají úhel 90°. Je možnost změny směru přenosu energie a to pouze kuželovitým ozubením. Podle druhu ozubení se dají kola dělit na: kola se zuby přímými, šikmými, hypoidními, šípovými a spirálními.

Účinnost ozubených převodů je závislá na druhu ozubení, drsnosti povrchu zubů, stupni opotřebení, přesnosti výroby aj. U kuželovitých ozubení dosahuje účinnost až 97% a u hypoidních ozubení mezi 94% až 96%. U soukolí, které jsou silně opotřebované se účinnost pohybuje kolem 85%. Na jednom stupni lze realizovat převod 1:8 až 1:10. U převodů vyšších je nutností zvolení dvou vícestupňových převodů.

- **Lanové převody**

Byly používány v minulosti, k přenosu síly sloužily lanovice s drážkami a lana, která byla dříve bavlněná a později ocelová. V dnešní době jsou lanové převody používány k pohonu výtahů, jeřábů atd. Jejich účinnost dosahuje až 99%. Prokluz bývá menší než u řemenových převodů, to ale záleží na provedení lanovice. Převodový poměr je maximálně 1:15.

- **Řetězové převody**

Z hlediska potřebného prostoru pro realizaci jsou řetězové převody nejúspornější. Nepotřebují předpětí a mají, stály převodový poměr, což je jejich velká výhoda. Jsou více finančně nákladné a mezi další nevýhodu patří nutnost jejich mazání a skutečnost, že jsou velice hlučné. K převodovým ústrojím

vodních turbín se používají článkové řetězy jednořadé a víceřadé. Řetězy jednořadé mohou pracovat pouze ve vodorovné poloze os ozubených kol, víceřadé mohou pracovat i ve vertikální poloze hřídelí ozubených kol. Kvůli spojení řetězu musí být počet článků řetězu sudý.

Nejčastěji jsou používány válečkové řetězy, u nichž platí, že čím je menší rozteč válečku, tím je možný větší převodový poměr. Převodový poměr je maximálně 1:15, nejmenší počet zubů v řetězovém kole je 11. Jejich účinnost dosahuje až 98,5%, při špatném mazání a při malém počtu zubů klesá. K mazání může být použit mazací tuk, ale pouze při malých rychlostech, u rychlostí do  $10 \text{ m.s}^{-1}$  je možnost řetězy promazávat v olejové lázni. Pomocí řetězových převodů lze převádět výkony asi až do 5000 kW.

- **Řemenové převody**

Jedná se o nerozšířenější druh převodu, v současnosti se jako nosné prvky řemenů používají uhlíková, polyamidová vlákna, textilní vložky aj. Hlavní výhodou je malá hlučnost a nízká pořizovací cena, k nevýhodě patří nestálý převodový poměr. Řemenové převody se používají pouze u těch zařízení, kde není nutnost přesného převodu, kde záleží na pružném zachycení a tlumení rázů a kde je pro jiný druh převodu příliš velká vzdálenost hřídelů.



**Obrázek 15:** Ozubené soukolí, řetězový převod, řemenový převod. (zleva) [10]

Z konstrukčního hlediska řemenové převody dělíme na:

- Ploché řemeny
- Klínové řemeny
- Ozubené řemeny

Plochými řemeny je možno realizovat převod až do maximálně 1:15. Obvodová rychlost by neměla být větší než  $70 \text{ m.s}^{-1}$ . Přepětí řemenů musí být navoleno od 1 až po 1,5 násobku síly, kterou je řemen namáhán při přenášeném výkonu. Účinnost se pohybuje v rozmezí od 96% až 98% a je závislá na úhlu opásání, materiálu řemenic a obvodové rychlosti.

Klínové řemeny jsou zařazeny mezi vyspělejší a pokročilejší než ploché řemeny. Májí ovšem vysoké požadavky na přesnosti výroby, je nutné je udržovat v čistotě a chránit je před mazivem, vodou apod. Je nutné při vyměňování vyměnit celou řadu řemenů, protože řemeny se při provozu postupně

protahují a to je jev nevratný. Lepší a výhodnější je použití násobných klínových řemenů. Obvodové rychlosti jsou omezeny hodnotami 40 až 60 m.s<sup>-1</sup>. Pracovní předpětí je nižší než u plochých řemen. Většinou v rozmezí 0,7 až 1 násobku síly, vyplynulého z velikosti přenášeného výkonu. Maximální převodový poměr bývá 1:10 s účinností kole 98%, pokud je převod špatně navržen klesá účinnost na 90%.

Ozubené řemeny jsou považovány za technicky nejdokonalejší řešení, vhodné pro výkony kolem 300 kW, účinnost dosahuje až 99%. [8]

### **2.6.8. Elektrotechnické zařízení MVE**

Elektrotechnická část v MVE se skládá z generátorů jako zdrojů, silových obvodů pro vyvedení výkonu, celou řadou pomocných zařízení vlastní spotřeby a řízení elektrárny. Elektrické generátory jsou točivé stroje, které mění mechanickou energii rotující hřídele, na níž je připevněno oběžné kolo vodního stroje na elektrickou energii. Jsou rozděleny na asynchronní a synchronní viz 2.6.9.

Volba mezi uvedenými typy generátoru závisí na požadavcích provozovatele MVE. V současnosti se většinou na MVE menších výkonů instalují asynchronní generátory. Silnoprúdová zařízení jsou určena k přenosu, spínání, jištění a transformaci vyrobené energie. Řídicí systém řídí automatický provoz MVE s občasným dozorem. Základní vlastnosti, které vyžadují, jsou spolehlivost, jednoduchost technických prostředků a programového vybavení. [8]

### **2.6.9. Generátory**

Elektrický generátor je stroj, jenž dokáže přeměnit mechanickou energii rotující hřídele na energii elektrickou. Ve většině případech na MVE se využívá generátorů se střídavým proudem. Z pravidla se tyto generátory dělí na synchronní a asynchronní.

Nejčastějšími generátory pro malé vodní elektrárny jsou generátory asynchronní. Pouze zřídka se využívá generátorů synchronních a to zejména z důvodu vyšší ceny a složitosti při řešení automatizace provozu a ochrany.

- **Asynchronní generátor**

Asynchronní generátory jsou konstrukčně velmi podobné asynchronním motorům. Elektrárny s menšími výkony mohou v některých případech využívat právě tohoto motoru jako funkčního asynchronního generátoru. Účinnost méně výkonových asynchronních generátorů se pohybuje okolo 90%.

Stator má trojfázové střídavé vinutí podobně jak u synchronního stroje. Rotor se využívá buď jako vinutý s kroužky nebo s klecovým vinutím, jenž nemá žádné citlivé součásti. Přivede-li se trojfázové napětí na svorky statoru, začne vznikat točivé magnetické pole, které následně indukuje proudy v rotorovém vinutí. Silové účinky těchto proudů zapříčiní otáčení rotoru ve směru magnetického pole a samotný stroj se začíná chovat jako motor.

Budeme-li chtít, aby motor pracoval stejně jako generátor, bude se muset na hřídel dodat takový mechanický moment, jenž otáčky rotoru navýší nad synchronní otáčky stroje. V takovém případě bude

rotor brzděn, a síti bude dodávat určitý činný výkon. Napříč tomu bude zároveň ze sítě odebírat jalový výkon pro vlastní magnetizaci. Samotný odběr jalového výkonu je velice nevýhodný, z tohoto důvodu se kompenzuje kondenzátory. Ovšem samotná kompenzace má za následek nebezpečí vzniku přepětí, samobuzení při výpadku sítě a zvýšení otáček hydroagregátu. Zabránit těmto situacím však lze rozpojením paralelní kombinace kondenzátor – generátor či dimenzováním kompenzačního výkonu kondenzátorů na pod kritickou hodnotu, tj. na výkon u kterého nebude docházet k samobuzení při chodu na prázdko.

Fázování generátoru se provádí pomocí jednoduchého připojení generátoru k síti za dosažení synchronních otáček. Proudový ráz, který nastane po připojení generátoru k síti je 2,5 – 3,5krát větší, než je hodnota jmenovitého proudu. Důsledkem použití asynchronního generátoru je zjednodušení ostatních elektrických zařízení, kdy se zmenšuje jejich celková hmotnost, a tím i jejich cena.

### **Použití asynchronního motoru jako generátoru**

Jak už bylo zmíněno, tak využití asynchronních motorů ve funkci generátoru je u malých vodních elektráren s menšími výkony zcela běžné. Důvodem je především jednoduchost připojení k síti, nízká cena a tím také i snadná dostupnost. Takovéto využití motoru je zejména vhodné při použití vodního kola. V této době ovšem k zakoupené turbíně je už většinou dodáván i vhodný generátor.

V případě využití asynchronního motoru jako generátoru, může být tento motor zatížen elektrickým výkonem, jenž odpovídá jeho příkonu - tedy jmenovitým proudem. V praxi se tato hodnota získá podílem jmenovitého výkonu a účinnosti motoru. Mezi nejběžněji takto používané motory patří motory čtyř, šesti nebo osmi pólové. Dle typu motoru se automaticky mění i synchronní otáčky stroje. Hodnota otáček musí správně odpovídat převodu mezi vodním motorem a asynchronním strojem, zejména kvůli vyšší účinnosti soustrojí a optimálního zatížení.

- **Synchronní generátor**

Synchronní generátor má stator se střídavým trojfázovým vinutím a rotor jednosměrným budícím vinutím. Konstrukční provedení vychází z velikosti generátoru a počtu pólů. Synchronní generátor má možnost regulovat napětí a frekvenci. Napětí je možno ovlivnit změnou budícího proudu. Uvedené způsoby platí pro případ samostatného provozu synchronního generátoru do autonomní sítě. Provoz MVE v samostatném chodu je ale spíše výjimkou. [13, 14]

### **3. Návrh optimalizace výkonu**

Aby bylo možno vybrat vhodné varianty pro optimalizaci výkonu, bylo nutné nejdříve provést šetření současného stavu MVE Domašov. Při několika inspekcích byl sledován výkon MVE, proměřen průtok turbínou a stavy vody v přívodním náhonu i odpadním kanále. Popis současného stavu jednotlivých částí je detailně rozveden v části 3.1 a navazující částí 3.2 je stručně zhodnocen. Možnosti optimalizace na základě současného stavu jsou shrnuty v bodu 3.3 a jsou zde popsány varianty, které budou posouzeny pomocí multikriteriální analýzy.

#### **3.1. Popis současného stavu**

Zkoumaná MVE se nachází na řece Bělé v obci Bělá pod Pradědem okres Jeseník. První zmínka o MVE je již z roku 1930 a dle dostupných informací byl provoz na této lokalitě ukončen v roce 1960. Celková rekonstrukce MVE po dlouhé odstavce proběhla v roce 2013 a v následném roce byla elektrárna uvedena do provozu. Při rekonstrukci bylo využito řady původních prvků – náhon, vtokový objekt, budova strojovny, odpadní kanál, které byly uvedeny do použitelného stavu a mírně upraveny. Těleso jezu i vzdouvací mechanismus byly nově vybudovány.

Předpokládaný maximální výkon soustrojí byl vypočten na 28 kW a předpokládaná průměrná roční výroba na 87,4 MWh. Během dvouletého provozu bylo dosaženo maximálního výkonu 24 kW a průměrná roční výroba činí 58 MWh. Výrazný rozdíl mezi předpokládanou a reálnou výrobou značně prodlužuje dobu návratnosti investic a je hlavním podmětem ke zpracování této diplomové práce. V podkapitolách níže je uveden popis současného stavu jednotlivých částí MVE Domašov a jsou uvedena základní hydrologická data lokality.

##### **3.1.1. Jez a vtokový objekt**

Nový vzdouvací objekt stavebně sestává z příčného prahu zapuštěného do dna řeky Bělé a rybí rampy viz příloha 4. Nový betonový práh je osazen vzduchovým poklopem – pohyblivé vzdouvací konstrukce – typový výkres viz příloha 5. Vzduchový poklop od firmy Hydrohrom o délce 6,5 m a výšce 0,75 m je ovládán zdvihací hadicí, kde ovládací médium je tlakový vzduch. Kompresor pro ovládání vzduchového poklopu je umístěn na levé břehu řeky.

V levé pobřežní zdi jsou vybourány dva otvory, jeden o rozměrech 4 x 0,5 m pro přívod vody do vtokového objektu a druhý o rozměrech 1,65 x 0,4 m pro vtok do rybochodu. Rybí rampa o šířce 1 m je navržena ve sklonu 1:10 a je lomená 90° obloukem o poloměru  $R = 1$  m. Dno rybochodu je zdrsňeno nepravidelně rozloženými kameny a v intervalu cca 1,5 m je vloženo několik větších kamenů, aby zajistily zklidnění protékající vody pro migrující ryby. Rybochod je umístěn tak, aby vývod z něj navazoval na původní rybí rampu na stupni Bělá řkm 25,257.

##### **3.1.2. Vtokový objekt**

Původní vtokový objekt byl prodloužen na 11,4 m tak, aby navazoval na odběrný otvor 4 x 0,5 m umístěný nad novým vzdouvacím zařízením a otvorem pro rybí rampu. Vtokový otvor je jištěn proti



vniku nečistot a ledu v zimním období hrubými česlemi, které jsou zhotoveny z ocelových prutů o rozteči 0,2 m. Vtokový objekt je zhotoven z betonového U profilu o tloušťce 0,3 m výšce 2,05 m a proměnné šířce 2,37 - 2,05 m. U-profil je napojen na odběrovou část z kamenného zdiva.

Zhruba v polovině vtokového objektu je umístěn elektronický odpuzovač ryb a na vyústění vtokového objektu do přívodního náhonu je osazeno stavidlo. Vtokový objekt je chráněn proti přístupu (pádu osob) do vtokové části oplocením viz obrázek 16.



**Obrázek 16:** Vtokový objekt MVE.

### **3.1.3. Přívodní náhon**

Přívodní levostranný náhon kopíruje trasu původního náhonu. Ten nebyl od roku 1960 používán, proto jej bylo potřeba vyčistit a v některých místech zcela obnovit. Celková délka otevřeného náhonu po rekonstrukci je 180 m, průměrný podélný sklon náhonu cca 2,8‰.

V první části dlouhé cca 130 m má kanál lichoběžníkový průřez se šířkou dna 1 m a sklony svahů 1:1,3. Tato část kanálu je vykopána v hlíněném podloží, dno a stěny jsou zpevněny kameny, spáry vyplněny betonem. Druhá část otevřeného náhonu je dlouhá cca 50 m, volně přechází z lichoběžníkového na obdélníkový průřez o šířce dna 1,5 m a výšce stěn 1 m. Dno i stěny této části jsou také zpevněny kamenem a spáry vyplněny betonem. Zakončení náhonu obsahuje bezpečnostní přepad, jalovou výpust celkové délky 10 m s ovládacím stavidlem o šířce 1 m.

Před vtokem do kašny jsou osazeny jemné česle s roztečí 25mm, provozní stavidlový uzávěr šířky 1,5 m za kterým následuje krátký trubní přivaděč DN 1,2 m délky 44 m s napojením na turbínu. Před provedením rekonstrukce bylo výpočtem ověřeno, zda má takto navržený kanál dostatečnou kapacitu pro potřebný maximální průtok 1 m<sup>3</sup>/s.

V důsledku podprůměrných průtoků v posledních letech a průtahům při uvádění do provozu, je otevřená část přívodního kanálu v současné době zarostlá hustým plevelem.

### 3.1.4. Strojovna

Budova MVE se nachází na levé břehu řeky Bělá, je součástí výrobního prostoru investora a je umístěna v jižní části provozní budovy. V 1.NP je strojovna s kašnou (v ní osazena Francisova turbína), sklad a dílna obsahující také montážní prostor s přístupem k hřídeli turbíny. V 2.NP je přístup do kašny, montážní a manipulační prostor pro vystrojení kašny (turbína, uzávěry) a půdní prostor. Objekt strojovny není vytápěn a je temperován pouze ztrátovým teplem od generátoru. Objekt je řešen tak, že technologické zařízení není ohroženo extrémními průtoky v přírodním náhonu, ani vzestupem spodní vody.

### 3.1.5. Technologické vybavení strojovny

V MVE Domašov je osazena původní dvojčítá horizontální Francisova turbína o hltnosti  $2 \times 0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , která prošla renovací. Francisova turbína je přetlaková turbína, což znamená, že pracovní kapalina během své cesty strojem mění tlak a přitom odevzdává svou energii. Turbína je regulovatelná naklápěním rozváděcích lopatek a je schopna provozu od průtoku  $0,2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Oběžné kolo turbíny se nachází mezi vysokotlakým přívodem a nízkotlakou savkou, která ústí do odpadního kanálu. Savka je tvarována tak, aby byla rychlost výstupní vody co nejnižší a proto je u výstupu z turbíny užší, zatímco na výstupu do vývěristě odpadního kanálu je širší. Na výstupním hřídeli je naklínována řemenice a pomocí plochého řemenu připojen asynchronní generátor převodem do rychlá viz obrázek 17.

Jako generátor je použit asynchronní motor SIEMENS s rotorem na krátko o jmenovitém výkonu 30 kW. Jedná se o osmi pólový elektromotor s otáčkami na prázdno  $740 \text{ min}^{-1}$ , účinnosti 92%, a účinníku 0,74.



**Obrázek 17:** Spojení generátoru a turbíny plochým řemenem.

Vyvedení výkonu z MVE je realizováno do sítě VN ČEZ-Distribuce přes rozvaděč MVE, který je umístěn na západním nároží strojovny. Zde je instalováno dálkové měření vyrobené energie a měření

vlastní spotřeby. Venkovní vedení vodičem AYKY 4B x 25 délky cca 28 m je zaústěno do distribuční trafostanice 22/0,4 kV s číslem JE 0258 na straně NN. Přívodní kabel je jištěn pojistkami 3 x 160 A osazenými v pojistkové skříni na rohu budovy. Elektroměrový rozváděč RE je připojen kabelem CYKY 4B16 pod omítkou napojeným na elektroměrový rozváděč RE, zapuštěný do zdi strojovny. Podružný rozváděč s automatikou je umístěn ve strojovně.

Automatika provozu je zajišťována automatem od firmy HYDROHROM, který zajišťuje automatické připojení k síti při dosažení synchronních otáček generátoru. Provádí průběžné měření vodní hladiny v kašně pomocí tlakového čidla a upravuje průtok turbínou pomocí nastavení lopatek. Při nežádaných stavech jako je pokles napětí, nebo změna frekvence je vybavena ochranou automatickým odpojením od sítě.

Kompenzace jalového výkonu je provedena pomocí digitálního regulátoru účinníku LOVATO typ DCRA 5. Ten zajišťuje automatickou korekci účinníku na požadovanou velikost min. 0,95 pomocí spínání tří kompenzačních kondenzátorů o hodnotách 12,5; 2,5 a 1 kVar.

### 3.1.6. Odpadní kanál

Odpadní kanál o celkové délce 160 m je složen ze dvou částí, do první části odpadního kanálu ústí vývar savky turbíny. Tato část se nachází pod současnou budovou výroby D&R Plast a pokračuje mezi budovami. Kanál o délce 48 m má obdélníkový průřez o šířce dna 2m, dále navazuje na zatrubněnou část o délce 112 m. Toto zatrubnění vzniklo v důsledku přístavby provozních objektů a bylo realizováno v době kdy MVE již nebyla v provozu. Zatrubnění je provedeno betonovými rourami o průměru 1,2 m při podélném sklonu 8,5‰. Odpadní kanál ústí do toku řeky téměř pravoúhle výtokovým objektem.

### 3.1.7. Vodohospodářské údaje:

Základní hydrologická data pro řeku Bělou v řkm 25,257 jsou následující:

Plocha povodí 37,72 km<sup>2</sup>

Průměrné roční srážky 1117 mm

Dlouhodobý průměrný průtok 0,798 m<sup>3</sup>/s

**Tabulka 2:** M - denní průtoky

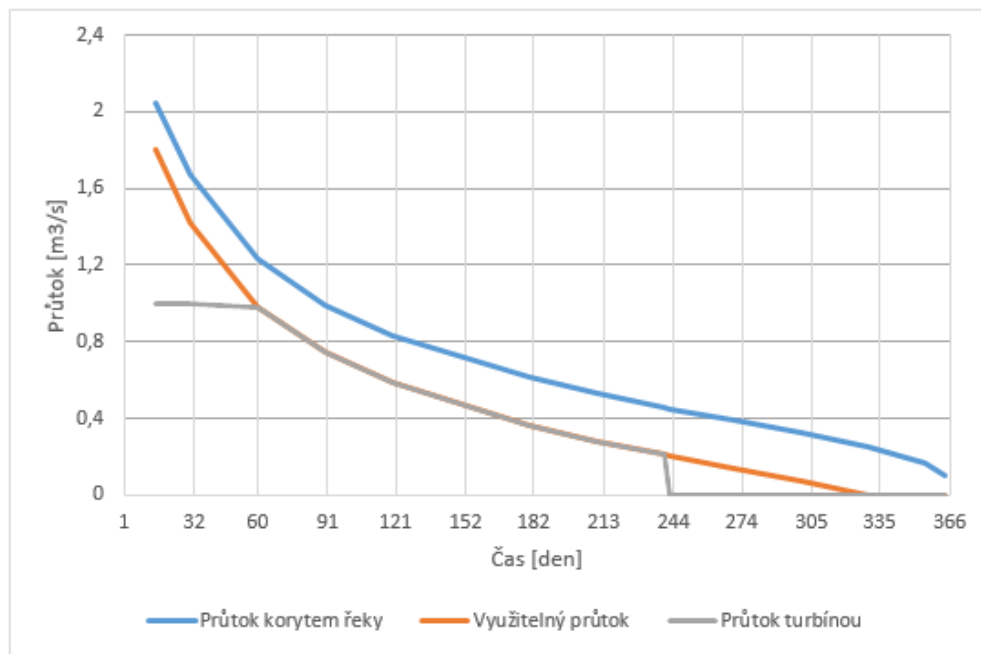
Překročení dny	30	60	90	120	18	210	240	270	300	330	355	364
Průtok m <sup>3</sup> /s	1.67	1.23	0.99	0.84	0.62	0.53	0.46	0.39	0.32	0.25	0.17	0.1

**Tabulka 3:** N - leté průtoky velkých vod

Četnost výskytu v letech	1	2	5	10	20	50	100
Průtok m <sup>3</sup> /s	7.5	12.8	23.1	33.3	45	66.2	85.4

Minimální zůstatkový průtok v korytě řeky Bělá je dáno hodnotou 330 denního průtoku – 0,251 m<sup>3</sup>/s. Při provozu MVE nesmí průtok poklesnout pod tuto hodnotu. Maximální průtok turbínou je 1 m<sup>3</sup>/s, minimální průtok při kterém je turbína schopna pracovat je 0,2 m<sup>3</sup>/s.

Z grafu na obrázku 18 lze vyčíst přibližný počet dní v roce, po které bude elektrárna v provozu.



**Obrázek 18:** Graf M denních průtoků korytem řeky Bělá.

## 3.2. Zhodnocení současného stavu

Zkoumáním místních podmínek bylo zjištěno, že turbína nepracuje dlouhodobě s plnou hltností 1 m<sup>3</sup>/s ani při maximálním průtoku korytem řeky. Výkon soustrojí nedosahuje požadované hodnoty a při maximálním průtoku se zjevně snižuje účinnost turbíny. Zhodnocení jednotlivých částí MVE je shrnuto v podkapitolách níže.

### 3.2.1. Vtokový objekt a náhon

Nový jez a vtokový objekt je navržen a proveden s dostatečnou kapacitou pro odběr průtoku 1 m<sup>3</sup>/s. Zároveň je dostatečně zajištěna ochrana při nadměrných průtocích a nebezpečí pádu osob do vtokového objektu. Vzhledem k optimalizaci výkonu elektrárny je tato část naprosto vyhovující a nejsou zde potřeba žádné další zásahy.

Prívodní náhon byl zrekonstruován tak, aby co nejvíce kopíroval trasu původního náhonu. Vycházelo se z předpokladu, že původní náhon měl dostatečnou kapacitu pro maximální průtok instalovanou turbínou – 1 m<sup>3</sup>/s.

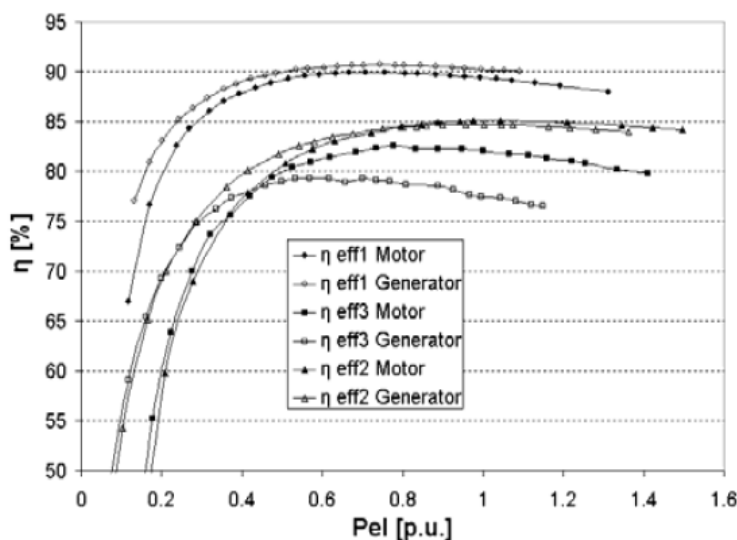
Z provozních zkušeností ale vyplívá, že při maximálním otevření turbíny dochází k poklesu hladiny a průtok turbínou musí být omezen. Nedostatečný průtok přívodním kanálem je způsoben buď chybným zhotovením, nebo faktem, že je kanál v současné době zarosten hustým plevellem. Pro zjištění příčiny bude proveden kontrolní výpočet ustáleného rovnoměrného proudění v kanále pomocí Chézyho rovnice.

### 3.2.2. Soustrojí turbína-generátor

Osazená horizontální dvojčítá turbína typu Francis je neznámého původu, avšak po její repasi se odhadovala maximální účinnost na 81 %, což je srovnatelné s účinností jiných turbín tohoto typu. Reálná účinnost této turbíny bude ověřena výpočtem a průběh účinností v závislosti na průtoku zanesen do grafu.

Turbína je připojena na asynchronní generátor pomocí plochého řemenového převodu do rychla. Účinnost převodu dosahuje běžně až 98%, při výpočtu účinnosti turbíny budu počítat se spodní hranicí účinnosti 95%, což je reálná hodnota nově zhotoveného převodu. Pro udržení optimální účinnosti převodu je nutné pravidelně kontrolovat dostatečné napínání řemene 1 až 1,5 násobek přenášeného výkonu.

Osazený asynchronní motor pracující ve funkci generátoru od firmy SIEMENS je konstruován se zvýšenou účinností - IE2. V motorickém chodu udává výrobce účinnost 92 %. Motory s vysokou účinností mají přibližně stejnou účinnost v celém rozsahu zatížení i v generátorickém chodu, jak je možno vidět na obrázku 18. Pro výpočet účinnosti turbíny budu tedy počítat s účinností jako v motorickém chodu.



**Obrázek 19:** Účinnost asynchronního motoru v generátorickém chodu.

Provoz turbíny je řízen automatem dle aktuální hladiny v kašně turbíny, ta je schopna využít maximální průtok v kanálu a nedochází ke ztrátám jako při manuálním řízení turbíny. Není potřeba uvažovat nad obměnou nedávno instalovaného zařízení.

### 3.2.3. Odpadní kanál

Odpadní kanál byl upraven při přístavbě, napojení původního otevřeného kanálu a zatrubněné části bylo provedeno v době, kdy nebyla MVE již v provozu. Spád zatrubněné části není možno během provozu MVE proměřit, avšak pokud bude při výpočtu účinnosti turbíny zjištěn výrazný pokles účinnosti je možno předpokládat, že tento pokles je způsoben nedostatečným odtokem vody od savky turbíny.

## 3.3. Možnosti optimalizace výkonu

Zkoumáním současného provozního stavu MVE byly zjištěny tři hlavní varianty optimalizace provozu. První možností je úprava přívodního náhonu, přičemž bude výpočtem ověřeno, zda je navržen na dostatečný průtok a bude jej potřeba jen vyčistit. Další možností jak optimalizovat provoz je úprava odpadního kanálu. Výpočtem provozní účinnosti turbíny bude ověřeno, zda je opodstatněné o této variantě uvažovat. Poslední možností je výměna stávající turbíny za novou s vyšší účinností.

### 3.3.1. Ověření přívodního náhonu

Ověření dostatečné kapacity přívodního náhonu je možno provést pomocí rovnice pro ustálené rovnoměrné proudění. Výpočet je proveden pomocí Chézyho rovnice (3.1): [2]

$$Q = CS\sqrt{Ri_0} \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (3.1)$$

kde  $v$  je průměrná průřezová rychlost,  
 $Q$  – průtok ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  
 $C$  – Chézyho rychlostní součinitel ( $\text{m}^{0.5}/\text{s}$ ),  
 $S$  – průtoková plocha kanálu ( $\text{m}^2$ )  
 $R$  – hydraulický poloměr kanálu ( $\text{m}$ ), přičemž  $R=S/O$ ,  
 $O$  – omočený obvod kanálu ( $\text{m}$ ),  
 $i_0$  – podélný sklon dna.

Pro výpočet Chézyho rychlostního součinitele bylo použito vztahu podle Manninga (3.2): [2]

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} \text{ [m}^{0.5}\text{/s]} \quad (3.2)$$

kde  $n$  je průměrná hodnota stupně drsnosti omočeného obvodu.

Pro účel výpočtu byl přírodní kanál rozdělen na dvě části, první část kanálu má lichoběžníkový průřez se šířkou dna 1 m a sklony svahů 1:1,3. Druhá část má obdélníkový tvar se šířkou ve dně 1,5 m a výškami stran 1 m. Obě části byly posouzeny samostatně. Drsnost povrchu pro obě části je stejná a byla určena z tabulkových hodnot [2] pro vyspárovaný kamenný povrch.

Hydraulický poloměr pro lichoběžníkový průřez: [2]

$$R_L = \frac{\frac{a+d}{2}v}{a+b+c} = 0,54 \text{ [m]} \quad (3.3)$$

kde  $a$  je šířka dna kanálu,  
 $b, c$  je délka omočeného svahu,  
 $d$  je délka hladiny ve výšce 1 m,  
 $v$  je maximální výška sloupce vody v kanálu.

Hydraulický poloměr pro obdélníkový průřez:

$$R_O = \frac{ab}{2a+b} = 0,43 \text{ [m]} \quad (3.4)$$

kde  $b$  je šířka dna kanálu,  
 $a$  výška omočených stěn.

Chézyho konstanta pro lichoběžníkový průřez:

$$C_L = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,03} 0,54^{\frac{1}{6}} = 30 \text{ [m}^{0,5}/\text{s]} \quad (3.5)$$

Chézyho konstanta pro obdélníkový průřez:

$$C_O = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0,03} 0,43^{\frac{1}{6}} = 28,65 \text{ [m}^{0,5}/\text{s]} \quad (3.6)$$

Průtok náhonem lichoběžníkového průřezu:

$$Q_L = 30 \cdot 2,3 \sqrt{0,54 \cdot 0,0028} = 2,7 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (3.7)$$

Průtok náhonem obdélníkového průřezu:

$$Q_O = 28,65 \cdot 1,5 \sqrt{0,46 \cdot 0,0028} = 1,46 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (3.8)$$

Výpočtem bylo ověřeno, že přírodní náhon má dostatečnou kapacitu v udržovaném stavu, důvodem nedostatečného průtoku je zanesení nečistotami a plevelem. Zanesena hustým plevelem a křovím je především část s lichoběžníkovým průřezem. Pokud se do výpočtu zahrne zvýšení drsnosti kanálu, průtok se výrazně sníží, viz výpočet (3.9) a (3.10), kde bylo použito stupně drsnosti pro kanál s hustým plevellem [2].

$$C_L = \frac{1}{0,1} 0,54^{\frac{1}{6}} = 9,02 \text{ [m}^{0,5}/\text{s]} \quad (3.9.)$$

$$Q_L = 30 \cdot 2,3 \sqrt{0,54 \cdot 0,0028} = 0,81 \text{ [m}^3/\text{s]} \quad (3.10)$$

Vypočtená hodnota přibližně odpovídá maximálnímu průtoku, při kterém je schopna turbína dlouhodobě pracovat bez poklesu hladiny v kašně. Je možno předpokládat že při zjednodušení výpočtu nedošlo k příliš velké odchylce a doporučit vyčištění současného náhonu jako jednu z variant optimalizace provozu MVE.

### 3.3.2. Ověření účinnosti turbíny

Během inspekce bylo provedeno několik měření průtoku, jejíž hodnoty spolu s opsaným výkonem generátoru posloužily jako základ pro určení přibližné účinnosti turbíny. Turbína je od neznámého výrobce proto je obtížné získat informace o jejím skutečném výkonu, avšak dle dostupných údajů z literatury [22][23], by měla dosahovat účinnost turbíny o velikosti oběžného kola DN500 přibližně 81%. Pro průběh Fransiovy turbíny je charakteristický mírný pokles účinnosti maximálně 2% při maximálním průtoku turbínou. Vyšší pokles účinnosti značí problémy s vířením vody pod savkou turbíny, což způsobuje nedostatečný odtok vody od savky. Pro ověření průběhu účinnosti bylo použito vzorce pro výkon elektrárny se započítáním účinnosti převodů a generátoru (3.11). [24]

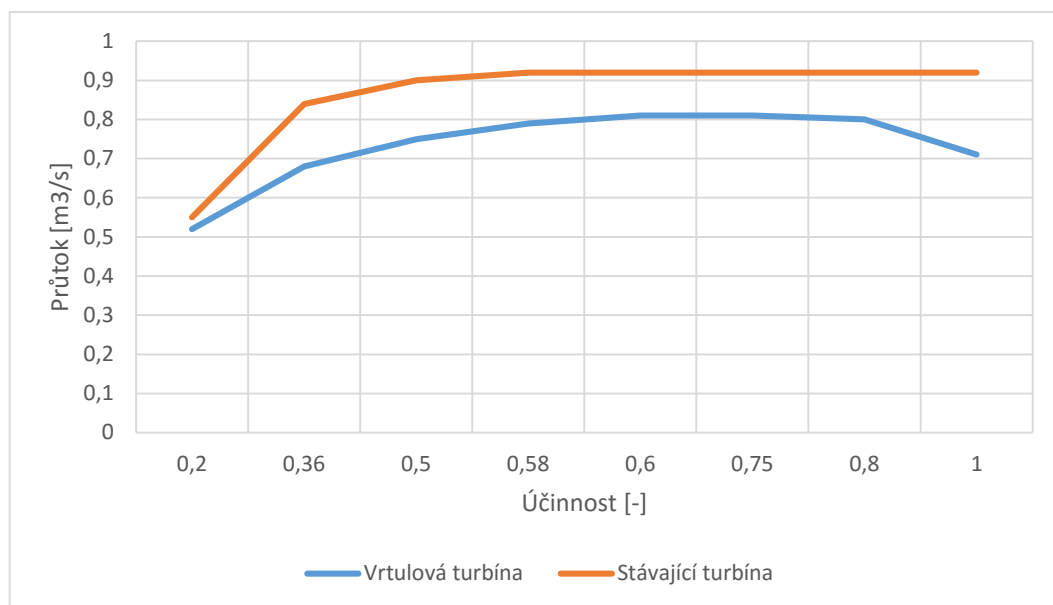
$$P = gQH\eta_G\eta_P\eta_T \text{ [kW]} \quad (3.11)$$

Tento vzorec byl do potřebného tvaru a za tíhové zrychlení  $g$  byla dosazena hodnota 9,81 obvyklá pro naši zeměpisnou šířku.

$$\eta_T = \frac{P}{9,81QH\eta_G\eta_P} \text{ [-]} \quad (3.12)$$

Vypočtené hodnoty účinnosti byly zaneseny do grafu obrázku 20, ve kterém je možno porovnat hodnoty s účinností nové vrtulové turbíny.





**Obrázek 20:** Porovnání účinností stávající a nové turbíny.

Ověřením účinnosti stávající turbíny bylo zjištěno, že dochází k velkému poklesu účinnosti při maximálním průtoku a proto bude jednou ze zkoumaných variant zkapacitnění odtokového kanálu, které lze provést změnou trasy odpadního kanálu. Dále bylo zjištěno, že stávající turbína má v celém provozním rozsahu nižší účinnost než nové vrtulové turbíny, jednou z variant optimalizace provozu proto bude výměna turbíny.

## 4. Multikriteriální analýza

Multikriteriální analýza slouží k objektivnímu výběru optimální varianty z konečného množství variant a to na základě několika kritérií. Tyto kritéria je nutno určit tak, aby co nejlépe charakterizovaly jednotlivé hodnocené varianty. Vzhledem k tomu, že kritéria nemají stejnou vypovídající hodnotu – stejnou váhu, je potřeba určit vektor vah kritérií, který jasně určí preferenci kritéria – důležitost v porovnání s ostatními. [16][21]

K tomuto účelu je možno využít různé metody, přičemž je možno obvykle získat různé výsledky. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl využít dvou rozdílných metod stanovení vah kritérií, metodu Fullеровu a metodu Saatyho. Tyto metody mají rozdílný přístup k určování vah kritérií a porovnáním výsledků MCA je sníženo riziko subjektivního hodnocení vybraných kritérií.

Pro porovnání variant byla vybrána metoda váženého součtu. Metoda váženého součtu (WSA) vychází z principu maximalizace užitku, předpokládá však pouze lineární funkci užitku. [16][17][18]

### **Vybrané varianty:**

Výsledkem zkoumání místních podmínek a současného stavu MVE bylo navržení celkem čtyř variant optimalizace výkonu.

$V_1$  – vyčištění stávajícího náhonu

$V_2$  – vyčištění náhonu a navýšení průtočnosti odpadního kanálu

$V_3$  – výměna stávající turbíny za novou

$V_4$  – kombinace variant 1 až 3

### **Vybraná kritéria:**

Po důkladném zhodnocení faktorů ovlivňujících vybrané varianty optimalizace výkonu byly vybrány tyto 4 kritéria:

$K_1$  – délka odstávky

$K_2$  – investiční náklady

$K_3$  – čistá současná hodnota - NPV

$K_4$  – doba návratnosti

## **4.1. Kritéria rozhodování**

Délka odstávky MVE je při hodnocení důležitá z hlediska možných ztrát příjmů, způsobených přerušением dodávky elektrické energie do sítě. Krátké přerušением provozu je možno provést v období s minimálním průtokem a nebude mít dopad na snížení příjmů. Investiční náklady nejen že ovlivňují dobu návratnosti, ale z hlediska investora je především nutno počítat s neochotou investovat do nedávno rekonstruované MVE. Hodnota NPV nejlépe vystihne návratnost vynaložených investic v průběhu životnosti MVE. Doba návratnosti je z hlediska investora také velmi důležitý údaj, obecně je posuzována doba návratnosti investic u malých vodních elektráren menší než 10 let jako dobrá.

### **4.1.1. $K_1$ – délka odstávky**

Délka odstávky se u jednotlivých variant značně liší, například vyčištění zanesené části kanálu o délce cca 150 m lze provést pomocí techniky za 2 dny. Naproti tomu výměna stávající turbíny za novou by byla zdlouhavá, kvůli nutným stavebním úpravám strojovny. Odhadovaná doba odstávky je znázorněna v tabulce 4. Při kombinaci jednotlivých variant je počítáno se souběžným provedením a je uvažována doba odstávky nejsložitější části.

**Tabulka 4:** Délka odstávky provozu

	Délka odstávky (dny)
V <sub>1</sub>	2
V <sub>2</sub>	40
V <sub>3</sub>	120
V <sub>4</sub>	120

#### 4.1.2. K<sub>2</sub> – investiční náklady

Investiční náklady, které bude nutno vynaložit na jednotlivé varianty optimalizace výkonu, jsou zaneseny do tabulky 5. Nejvyšší náklady by si vyžádalo nahrazení stávající Francisovy turbíny za novou vrtulovou turbínu. Nejnižším a poměrně zanedbatelným výdajem by bylo vyčištění přívodního náhonu.

**Tabulka 5:** Investiční náklady.

	Investiční náklady (tis Kč)
V <sub>1</sub>	6
V <sub>2</sub>	156
V <sub>3</sub>	1600
V <sub>4</sub>	1756

#### 4.1.3. K<sub>3</sub> – čistá současná hodnota – NPV

Pro výpočet čisté současné návratnosti je nejprve potřeba určit jakým způsobem se zvýší roční produkce elektrické energie a na základě výkupních cen bude možno určit čistý peněžní tok CF<sub>T</sub>, který bude uvažován jako konstantní. Výkupní ceny budou uvažovány jako pevné ke dni hodnocení, jelikož se v dnešní době podpora státu pro obnovitelné zdroje jen těžce odhaduje a pro účel práce je tento způsob dostatečný. Diskontní sazba bude uvažována ve výši 5% a doba životnosti projektu 25 let. Výpočet NPV provedeme pomocí vzorce (4.1). [15]

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{\Sigma}} \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad [Kč] \quad (4.1)$$

**Tabulka 6:** NPV jednotlivých variant.

	<b>Roční navýšení výkonu (MWh)</b>	<b>CF<sub>T</sub> (Kč)</b>	<b>NPV (tis Kč)</b>
<b>V<sub>1</sub></b>	5.01	13026	177
<b>V<sub>2</sub></b>	10.8	28080	239
<b>V<sub>3</sub></b>	11.27	29302	-1187
<b>V<sub>4</sub></b>	22.1	57460	-946

#### 4.1.4. K<sub>4</sub> – doba návratnosti

Doba návratnosti vybraných 4 variant se výrazně liší, zejména kvůli rozdílným investičním nákladům. Doba návratnosti jednotlivých variant byla vypočtena pomocí (4.2). První varianta vykazuje nejkratší dobu návratnosti, naopak nejdelší dobu návratnosti vykazuje varianta 3, jejíž hodnota je výrazně vyšší než předpokládaná doba životnosti. Tabulka 7 znázorňuje přehled všech variant.

$$T_N = \frac{IN}{CF_T} \text{ [rok]} \quad (4.2)$$

Příklad výpočtu:

$$T_{N1} = \frac{6}{13} \cong 0,5 \text{ [rok]} \quad (4.3)$$

**Tabulka 7:** Doba návratnosti

	<b>CF<sub>T</sub> (Kč)</b>	<b>Doba návratnosti (roky)</b>
<b>V<sub>1</sub></b>	13026	0.5
<b>V<sub>2</sub></b>	28080	5.6
<b>V<sub>3</sub></b>	29302	54.6
<b>V<sub>4</sub></b>	57460	30.6

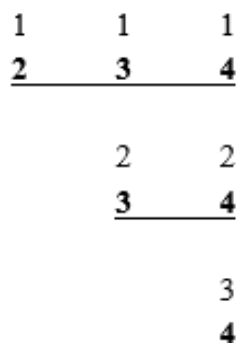
## 4.2. Fullerova metoda

Při větším počtu kritérií je výhodné srovnávat navzájem vždy pouze dvě kritéria, o kterých snáze rozhodneme, které je důležitější. Jednou z možností pro vyhodnocení těchto srovnání poskytuje tzv. Fullerův trojúhelník. Za předpokladu, že jednotlivá kritéria jsou pevně očíslována pořadovými čísly 1, 2, . . . , n, je Fullerův trojúhelník tvořen dvojřádky, v nichž se každá dvojice kritérií vyskytne právě

jednou. U každé dvojice hodnotitel zakroužkuje nebo jinak vyznačí číslo toho kritéria, které považuje za důležitější, takže pro kritérium  $K_j$  představuje počet zakroužkovaných čísel  $j$  počet jeho preferencí, který označíme  $f_j$ . Protože při počtu kritérií  $n$  je počet párových srovnání roven kombinačnímu číslu  $\binom{n}{2}$ , tj. pro normovanou váhu kritéria  $K_j$  platí: [17][18]

$$v_j = \frac{f_j}{\frac{n(n-1)}{2}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

Schéma Fullerova trojúhelníku s tučně vyznačenými preferovanými kritérii je znázorněno na obrázku 21 níže.



**Obrázek 21:** Fullerův trojúhelník

Pro každé kritérium je nutno spočítat kolikrát je označeno jako preferované před jiným kritériem. Počet preferencí pro každé kritérium je vyděleno počtem všech porovnávání. Tím získáme váhy, které jsou vyznačeny ve třetím sloupci tabulky 8, přičemž součet vah kritérií je roven 1. [16][18]

Příklad výpočtu:

$$v_3 = \frac{2}{\frac{4(4-1)}{2}} = \frac{1}{3} [-] \quad (4.5)$$

**Tabulka 8:** Vypočtené váhy.

Kritérium	Počet preferencí	Váha
$K_1$	0	0
$K_2$	1	1/6
$K_3$	2	1/3
$K_4$	3	1/2
<b>Celkem</b>	6	1

Nevýhodou metody párového srovnávání je skutečnost, že nejméně důležité kritérium má nulovou váhu, i když nemusí jít o zcela bezvýznamné kritérium. Tento nedostatek lze odstranit tak, že četnost preferencí každého kritéria bude navýšen o 1 a jmenovatele zlomku ve vzorci (3) zvýšíme o n.

Příklad výpočtu:

$$v_3 = \frac{3}{\frac{4(4-1)}{2} + 4} = 0,3 \text{ [-]} \quad (4.6)$$

**Tabulka 9:** Upravené váhy kritérií.

Kritérium	Počet preferencí	Váha	Navýšený počet kritérií	Upravená váha
<b>K<sub>1</sub></b>	0	0	1	0.1
<b>K<sub>2</sub></b>	1	1/6	2	0.2
<b>K<sub>3</sub></b>	2	1/3	3	0.3
<b>K<sub>4</sub></b>	3	1/2	4	0.4
<b>Celkem</b>	6	1	10	1

Výsledný vektor vah kritérií vypočtený metodou Fullerova trojúhelníku má tvar:

$$V = (0,1; 0,2; 0,3; 0,4) \quad (4.7)$$

### 4.3. Saatyho metoda

Saatyho metodu stanovení vah kritérií lze rozdělit do dvou kroků. První krok je analogický metodě párového srovnávání, kdy se opět zjišťují preferenční vztahy dvojic kritérií a uvádějí se do tzv. Saatyho matice S, která je symetrická, s prvky  $s_{ij}$ . Na rozdíl od metody párového srovnávání se však kromě směru preference dvojic kritérií určuje také velikost této preference, která je vyjádřena určitým počtem bodů ze zvolené bodové stupnice, přičemž Saaty doporučuje využít pro vyjádření velikosti preferencí bodové stupnice opatřené tzv. deskriptory, uvedené v tabulce 10. Síla preferencí je vyjádřena v intervalu [1;9]. Výsledkem tohoto kroku je získání pravé horní trojúhelníkové části matice velikostí preferencí (Saatyho matice). Pro diagonální prvky pak platí, že  $s_{ii}=1$  pro inverzní prvky (v levé dolní trojúhelníkové části matice) platí: [16][17]

$$s_{i,j} = \frac{1}{s_{j,i}} \quad (4.8)$$

**Tabulka 10:** Bodová stupnice Saatyho metody

Počet bodů	Deskriptor
1	Kritéria jsou stejně významná
3	První kritérium je slabě významnější než druhé
5	První kritérium je dosti významnější než druhé
7	První kritérium je prokazatelně významnější než druhé
9	První kritérium je absolutně významnější než druhé

Prvky  $s_{ij}$  Saatyho matice jsou odhadem podílů vah kritérií  $v_i$  a  $v_j$ , takže platí

$$s_{i,j} \cong \frac{v_i}{v_j} \quad (4.9)$$

Váhy se pak dají získat následujícím způsobem

$$\min F = \sum_i^n \sum_j^n (s_{i,j} - \frac{v_i}{v_j})^2 \quad (4.10)$$

za podmínky

$$\sum_i^n v_i = 1 \quad (4.11)$$

Z důvodu obtížnosti je možné získat váhy pomocí algoritmu založeného na geometrickém průměru. [16][17]

$$\min F = \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n [\ln s_{i,j} - (\ln v_i - \ln v_j)]^2 \quad (4.12)$$

za podmínky

$$\sum_i^n v_i = 1 \quad (4.13)$$

Řešením je

$$v_i = \frac{[\prod_j^n s_{i,j}]^{\frac{1}{n}}}{\sum_i^n [\prod_j^n s_{i,j}]^{\frac{1}{n}}} \quad (4.14)$$

vycházející z geometrického průměru řádků.

Uplatněním Saatyho metody pro stanovení vah kritérií je vytvořena tabulka 11. Velikost preference je vyjádřena přiřazením určitého počtu bodů z bodové stupnice opatřené deskriptory, uvedené v tabulce 10. Pokud je kritérium uvedené v řádku významnější než kritérium uvedené ve sloupci, zapíše se do příslušného políčka počet bodů, kterým je vyjádřena velikost preference kritéria v řádku vzhledem ke kritériu ve sloupci. Pokud je naopak kritérium ve sloupci významnější než kritérium v řádku, zapíše se do příslušného políčka převrácená hodnota zvoleného počtu bodů. [18][21]

$$G_4 = (s_{4,1} \cdot s_{4,2} \cdot s_{4,3} \cdot s_{4,4})^{\frac{1}{4}} = (5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 1)^{\frac{1}{4}} = 2,94 [-] \quad (4.15)$$

**Tabulka 11:** Preference dvojic kritérií v Saatyho metodě

Kritérium	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	Geometrický průměr řádků
K <sub>1</sub>		1/3	1/5	1/5	0,34
K <sub>2</sub>			1/5	1/5	0,59
K <sub>3</sub>				1/3	1,7
K <sub>4</sub>					2,94

Pomocí tabulky 11 s využitím vztahu (4.8) je možno stanovit Saatyho matici. Prvky na diagonále této matice jsou jedničky, prvky nad diagonálou jsou obsaženy v tabulce 11. Prvky pod diagonálou byly získány jako převrácené hodnoty odpovídajících prvků nad diagonálou. Saatyho matice má tvar:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 \\ 3 & 1 & 1/5 & 1/5 \\ 5 & 5 & 1 & 1/3 \\ 5 & 5 & 3 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Příklad výpočtu:

$$s_{1,2} = \frac{1}{s_{2,1}} = \frac{1}{3} [-] \quad (4.17)$$



Jestliže nyní tyto řádkové geometrické průměry znormujeme, dostaneme normované váhy souboru kritérií. Tyto váhy jsou pro srovnání uvedeny společně s vahami stanovenými Fullerovou metodou.

$$v_1 = \frac{0,34}{5,57} = 0,06 \text{ [-]} \quad (4.18)$$

**Tabulka 12:** Váhy kritérií dle použitých metod

Kritérium	Váhy kritérií dle metody	
	<i>Fullerova</i>	<i>Saatyho</i>
<b>K<sub>1</sub></b>	0,1	0.06
<b>K<sub>2</sub></b>	0,2	0.1
<b>K<sub>3</sub></b>	0,3	0.3
<b>K<sub>4</sub></b>	0,4	0.53

Porovnáním dvou metod výpočtu vah kritérií bylo zjištěno, že pořadí vah jednotlivých kritérií zůstává stejné, tedy největší váhu při hodnocení variant optimalizace výkonu má doba návratnosti, druhou je NPV následována investičními náklady a nejmenší váhu má doba odstávky. Váha kritéria K<sub>4</sub> má vyšší hodnotu při použití Saatyho metody, váha kritérií K<sub>3</sub> a K<sub>4</sub> naopak nižší. Toto je způsobeno možností přesnějšího odlišení důležitosti kritérií pomocí stupnice bodů. Saatyho metodu lze hodnotit v tomto případě jako přesnější, protože přesněji rozlišuje důležitost kritérií. Při výpočtu MCA budou použity oba výsledky, aby mohl být porovnán vliv použité metody při výběru vah kritérií.

#### 4.4. Metoda váženého součtu – WSA

Jak již bylo zmíněno výše metoda WSA vychází z principu maximalizace užitku, nejprve je nutno vytvořit kritériální matici, přičemž řádky matice budou tvořit jednotlivé varianty a sloupce matice kritéria podle kterých provádíme hodnocení. V dalším kroku je nutno vytvořit tzv. normalizovanou kritériální matici  $R=(r_{ij})$ , jejíž prvky získáme z kritériální matice  $Y=(y_{ij})$ , pomocí transformačního vzorce (4.19). [16][17][19][20]

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}-D_j}{H_j-D_j} \quad (4.19)$$

Tato matice již představuje matici hodnot užitku z i-té varianty podle j-tého kritéria. Podle vzorce (4.19) lineárně transformujeme kritériální hodnoty tak, že  $r_{ij}$  nabývá hodnot od 0 do 1,  $D_j$  odpovídá minimální hodnotě kritéria ve sloupci j a  $H_j$  odpovídá maximální hodnotě ve sloupci j. Vztah (4.20) se používá v případě, že kritérium v daném sloupci j je považováno za maximalizační. Pro případ minimalizačního kritéria lze provést normalizaci takového sloupce v matici přímo použitím vztahu: [16]

$$r_{ij} = \frac{H_j - Y_{ij}}{H_j - D_j} \quad (4.20)$$

Pro určení užitku jednotlivých variant je využit vzorec (4.21), kde výsledný užitek varianty je určen jako suma násobků vah kritérií a normalizované hodnoty. Varianta, která dosáhne maximální hodnoty, bude vybrána jako nejlepší a zbylé varianty budou uspořádány sestupně. [16]

$$u_i = \sum_j^k v_j r_{ij} \quad (4.21)$$

#### 4.4.1. Výpočet pomocí WSA metody

Nejprve byla vytvořena kritériální matice (4.22), jejíž řádky tvoří varianty optimalizace výkonu a sloupce hodnoty jednotlivých kritérií, podle kterých jsou varianty posuzovány.

$$Y = \begin{bmatrix} 2 & 6 & 177 & 0,5 \\ 40 & 156 & 239 & 5,6 \\ 120 & 1600 & -1187 & 54,6 \\ 120 & 1756 & -946 & 30,6 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Poté pomocí transformačních vzorců (4.19) a (4.20) byla provedena normalizace matice, přičemž kritérium  $k_3$  bylo identifikováno jako maximalizační a kritéria  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_4$  jako minimalizační.

Příklad výpočtu:

$$r_{21} = \frac{H_1 - Y_{21}}{H_1 - D_1} = 0,67 \quad [-] \quad (4.23)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0,95 & 1 \\ 0,67 & 0,94 & 1 & 0,9 \\ 0 & 0,09 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,16 & 0,44 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Výsledná normalizovaná matice má tvar (4.24), vynásobením řádků pomocí získaného vektoru vah dostaneme konečnou hodnotu užitku jednotlivých variant. V tabulce 13 jsou porovnány výsledky s použitím Saatyho a Fullerovy metody s vyznačeným pořadím variant.

**Tabulka 13:** Srovnání výsledků MCA při použití různých metod.

Varianta	Fullerova metoda	Pořadí	Saatyho metoda	Pořadí
V <sub>1</sub>	0,985	1	0,975	1
V <sub>2</sub>	0,915	2	0,9112	2
V <sub>3</sub>	0,018	4	0,009	4
V <sub>4</sub>	0,224	3	0,2812	3

Příklad výpočtu:

$$u_1 = r_{11} * v_1 + r_{11} * v_1 + r_{12} * v_2 + r_{13} * v_3 + r_{14} * v_4 = 0,985 \text{ [–]} \quad (4.25)$$

Pomocí multikriteriální analýzy bylo zjištěno, že nejlepší variantou pro optimalizaci výkonu je první varianta – vyčištění přírodního náhonu. Druhou nejlepší variantou je vyčištění náhonu a při současném zkapacitnění odpadního kanálu. Variantu 3 a 4 je možno hodnotit jako nevyhovující a nedoporučit její realizaci. Pořadí variant se při použití různých metod určení vah kritérií nemění a varianty vykazují malou odchylku. Lze předpokládat, že hodnocení bylo objektivní a první i druhou variantu je možno doporučit k realizaci. Při výběru vítězné varianty je potřeba brát ohled na aktuální finanční možnosti provozovatele.

## 5. Závěr

Ve své diplomové práci jsem se zabýval návrhem optimalizace provozu malé vodní elektrárny na řece Bělá v okrese Jeseník. Tato elektrárna byla uvedena do provozu před dvěma lety a to na stejném toku, jako MVE jejíž rekonstrukci jsem navrhoval v rámci bakalářské práce. Po letech se mi tak naskytla jedinečná příležitost, prozkoumat a zhodnotit provoz MVE, která má podobné hydrologické podmínky. Během několika inspekcí byl prozkoumán současný stav provozu MVE, jehož zhodnocením jsem dospěl k několika zásadním poznatkům.

Zkoumaná MVE má nedostatečný průtok přírodním náhonem pro maximální průtok turbínou 1 m<sup>3</sup>/s, což má za následek provozování turbíny na 80% hltnosti, i při dostatečném průtoku vody v korytě řeky. Výpočtem bylo ověřeno provedení náhonu, a pokud provozovatel poskytl správné údaje o podélném sklonu náhonu je možno říci, že nedostatečný průtok je způsoben pouze zanesením náhonu nečistotami, nikoliv jeho špatným stavebním provedením. Dále byl zjištěn výrazný pokles účinnosti turbíny, v případě, že se průtok turbínou blíží maximální hltnosti. Menší pokles účinnosti při maximálním průtoku je u Francisových turbín běžný, v tomto případě je ale na vině s největší pravděpodobností špatné provedení odpadního kanálu. Při velkém průtoku turbínou se voda v kanálu hromadí, zvyšuje se víření vody pod savkou turbíny a tím snižuje celková účinnost přeměny energie. Průběžným měřením průtoku turbínou byla vypočtena její přibližná účinnost 78% a 81%. Tato hodnota odpovídá údajům starších Francisových turbín s oběžným kolem DN500, které je možno dohledat v odborné literatuře. Repase původní turbíny výrazně nesnížila její účinnost, avšak v porovnání s novými vrtulovými turbínami, jejichž účinnost dosahuje až 92%, se jedná o hodnotu spíše podprůměrnou. Z tohoto důvodu byla mezi varianty optimalizace provozu MVE zahrnuta i varianta pořízení nové turbíny.

Celkem byly navrženy čtyři varianty optimalizace výkonu MVE. První variantou bylo vyčištění náhonu, čímž by bylo možno provozovat turbínu při plné hltnosti, v průměru po dobu 60 - ti dnů v roce. Tato varianta se vyznačovala nejnižšími investičními náklady, nejkratší dobou odstávky, nejrychlejší dobou návratnosti investic, ovšem také nejmenším navýšením vyrobené elektrické energie. Druhou variantou bylo vyčištění náhonu a zkapacitnění odpadního kanálu, tak aby nedocházelo k tak výraznému poklesu účinnosti turbíny při vyšším průtoku. Tato varianta se vyznačovala nejvyšší mírou čisté současné hodnoty, což bylo na druhé straně vykoupeno vyššími náklady, a tím i delší dobou návratnosti. Třetí variantou optimalizace provozu bylo nahrazení stávající Francisovy turbíny za novou vrtulovou. Vzhledem k navýšení účinnosti v celém rozsahu průtoků bylo podle očekávání dosaženo vyšší roční výroby energie. Ovšem z důvodů značných investičních nákladů na pořízení nové turbíny a potřebným stavebním úpravám, dopadla z hlediska návratnosti investic a NPV tato varianta nejhůře. Poslední variantou byla kombinace výše zmíněných tří variant, tedy současného vyčištění přírodního kanálu, zkapacitnění odpadního kanálu a instalace nové turbíny. Tato varianta se vyznačovala nejvyšším dosaženým navýšením roční výroby elektrické energie. Vlivem vysokých investičních nákladů byla doba návratnosti až za hranicí uvažované doby životnosti díla a NPV vyšla v záporných hodnotách.

Pro porovnání těchto čtyř variant byla použita metoda váženého součtu, na základě čtyřech zmíněných kritérií. Jednotlivá kritéria nemají při rozhodování stejný význam, a proto byla pro určení jejich vah použita Fullerova a Saatyho metoda. Použitím dvou metod pro určení vah kritérií bylo možno ověřit objektivní posouzení a v závěru porovnat, zda se pořadí variant při různých metodách nemění. Výsledek multikriteriální analýzy je zanesen do tabulky 14.

**Tabulka 14:** Pořadí variant optimalizace provozu MVE.

<b>Varianta</b>	<b>Fullerova metoda</b>	<b>Pořadí</b>	<b>Saatyho metoda</b>	<b>Pořadí</b>
<b>V<sub>1</sub></b>	0,985	<b>1</b>	0,975	<b>1</b>
<b>V<sub>2</sub></b>	0,915	2	0,9112	2
<b>V<sub>3</sub></b>	0,018	4	0,009	4
<b>V<sub>4</sub></b>	0,224	3	0,2812	3

Nejlépe hodnocenou variantou je první varianta – vyčištění přívodního náhonu. Tuto variantu je možné doporučit k realizaci. Dojde k navýšení roční výroby o přibližně 5MWh, což je při současných výkupních cenách této MVE 2.600,- Kč / MWh, navýšení ročního příjmu o 13.000,- Kč. Doporučuji rovněž zvážit druhou variantu, jejíž přínos je dlouhodobě vyšší. Je však složitější a její realizace, co se týče stavebního řízení, bude jistě zdlouhavější.

# Literatura

- [1] Vodní energie. *Nazeleno* [online]. 2015 [cit. 2015-12-10]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/>
- [2] DUŠIČKA, Peter. *Malé vodní elektrárny*. Bratislava: Jaga group, 2003. ISBN 80-88905-45-1.
- [3] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [4] Malá vodní elektrárna Spálov. *MVE\_Spálov* [online]. Hradec Králové, 2012 [cit. 2016-1-12]. Dostupné z: <http://mvespalov.sweb.cz/>
- [5] Vodní elektrárny princip a rozdělení. *OENERGETICE* [online]. 2015 [cit. 2016-1-29]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/obnovitelne-zdroje-energie/vodni-elektrarny-princip-a-rozdeleni/>
- [6] MASTNÝ, Petr, Jiří DRÁPELA, Stanislav MIŠÁK, Jan MACHÁČEK, Michal PTÁČEK, Lukáš RADIL, Tomáš BARTOŠÍK a Tomáš PAVELKA. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011, 254 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- [7] Malé vodní elektrárny - proč, kde a jak. *ALTERNATIVNÍ ENERGIE* [online]. Brno, 2016 [cit. 2016-2-15]. Dostupné z: [http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/male\\_vodni\\_elektrarny\\_proc\\_kde\\_a\\_jak.pdf](http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/male_vodni_elektrarny_proc_kde_a_jak.pdf)
- [8] DOLINSKÝ, Josef. *Rekonstrukce malé vodní elektrárny*. [online]. Ostrava. 2008 [cit. 2016-03-10]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/handle/10084/66340>. Bakalářská práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [9] Vodní elektrárny. *HYDROHROM* [online]. Bystřice, 2010 [cit. 2016-3-15]. Dostupné z: <http://www.hydrohrom.cz/CZ/pohyblive-jezy.html>
- [10] Abeceda malých vodních pohonů. *Malá voda* [online]. 2003 [cit. 2016-3-15]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/>
- [11] HAJDA, Jindřich. Obnova jezu a MVE v lokalitě Hlubočky. [online]. Brno. 2014 [cit. 2016-3-15]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=89963](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=89963). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] Abeceda malých vodních pohonů: Kolo nebo turbína. *Malá voda* [online]. 2003 [cit. 2016-4-1]. Dostupné z: <http://mve.energetika.cz/sikovneruce/kolokontraturbina.htm>
- [13] GABRIEL, Pavel, František ČIHÁK a Petr KALANDRA. *Malé vodní elektrárny*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 80-01-01812-1.
- [14] HOLATA, Miroslav. *Malé vodní elektrárny: projektování a provoz*. Vyd. 1. Editor Pavel GABRIEL. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0828-4.

- [15] FOTR, Jiří, Jiří DĚDINA a Helena HRŮZOVÁ. Manažerské rozhodování. 3. přeprac. vyd. Praha: Ekopress, 2003. ISBN 80-86119-69-6.
- [16] FIALA, Petr, Josef JABLONSKÝ a Miroslav MAŇAS. Vícekriteriální rozhodování. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola ekonomická [Praha], 1994. ISBN 80-7079-748-7.
- [17] RAMÍK, Jaroslav. Vícekriteriální rozhodování - analytický hierarchický proces (AHP). Vyd. 1. Karviná: Slezská univerzita, 1999. ISBN 80-7248-047-2.
- [18] JAROŠ, František. Pravděpodobnost a statistika. Vyd. 1. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická [Praha], 1994. ISBN 80-7080-208-1.
- [19] PÍŠEK, Milan a František HANUŠ. Rozhodovací analýza: příklady. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01191-7.
- [20] ŘÍHA, Josef. Hodnocení vlivu investic na životní prostředí: vícekriteriální analýza a EIA. Vyd. 1. Praha: Academia, 1995. ISBN 80-200-0242-1.
- [21] ČERNÝ, Martin a Dagmar GLÜCKAUFOVÁ. *Vícekriteriální vyhodnocování v praxi*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [22] MELICHAR, Jan, Jan VOJTEK a Jaroslav BLÁHA. Malé vodní turbíny: konstrukce a provoz. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-01-01808-3.
- [23] BEDNÁŘ, Josef. Turbíny: (malé vodní elektrárny). Českovice: Marcela Bednářová, c2013. ISBN 978-80-905437-0-6.
- [24] PAŽOUT, František. Malé vodní elektrárny. 2., přeprac. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. ISBN 80-03-00192-7.

## **Přílohy:**

**Příloha 1:** Fotodokumentace vtokového objektu

**Příloha 2:** Fotodokumentace přívodního kanálu

**Příloha 3:** Fotodokumentace odpadního kanálu

**Příloha 4:** Půdorys vzdouvacího objektu a rybí rampy

**Příloha 5:** Vzduchový poklop – pohyblivé vzdouvací konstrukce



## Příloha 1: Fotodokumentace vtokového objektu





## **Příloha 2:** Fotodokumentace přírodního kanálu

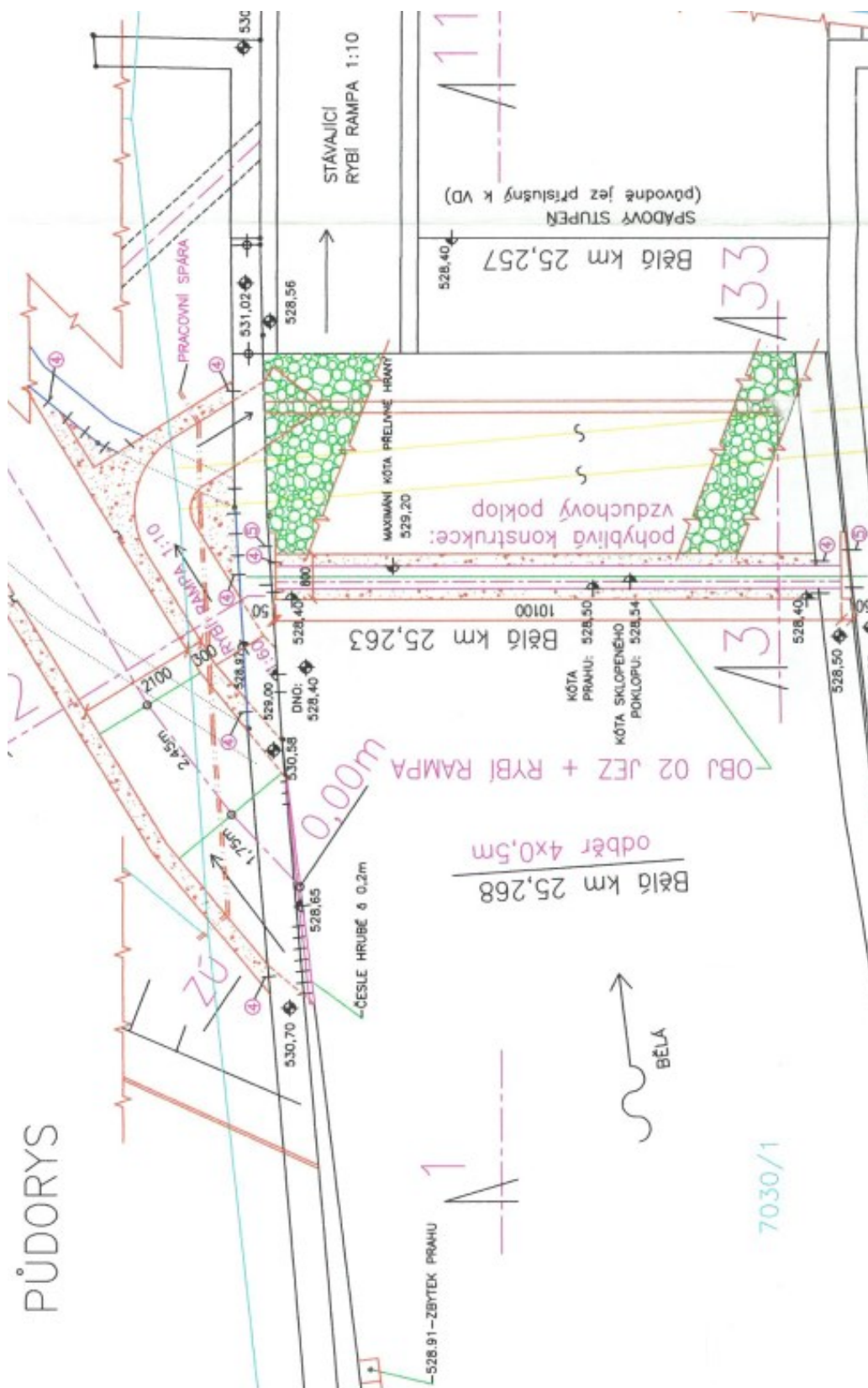




### **Příloha 3: Fotodokumentace odpadního kanálu**



#### **Příloha 4: Půdorys vzdouvacího objektu a rybí rampy**



## Příloha 5: Vzduchový poklop – pohyblivé vzdouvací konstrukce

